



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝVOJ PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO VÝROBU
STRUKTUROVANÉHO MATERIÁLU TECHNOLOGIÍ
KOVOVÉHO 3D TISKU**

PROCESS PARAMETERS DEVELOPMENT FOR PRODUCING OF LATTICE STRUCTURES USING 3D
METAL PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Moravčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Vrána

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jaroslav Moravčík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radek Vrána**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vývoj procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií kovového 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě strukturovaného materiálu technologií SLM dochází ke zvětšování nebo zmenšování reálného průměru prutu v závislosti na zvolených procesních parametrech, strategii výroby a geometrii prutu. Pro přesnou výrobu strukturovaných dílů je proto nutné tento fenomén popsat a zavést potřebné změny (korekce rozměru, změna procesních parametrů). To umožní přesnou výrobu strukturovaných nebo kombinovaných dílů (kombinace strukturovaného a plného materiálu) s očekávanými mechanickými vlastnostmi.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je nalezení vhodné kombinace procesních parametrů a korekčních parametrů pro přesnou výrobu prutů technologií SLM.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- studium zdrojů zaměřených na danou problematiku,
- vyhodnocení již naměřených dat a stanovení závěrů,
- vytvoření skriptu v programu excel pro stanovení optimálních procesních parametrů pro základní BCC mikro–prutovou strukturu
- návrh experimentu na základě vytvořeného excelu (počet vzorků, procesní parametry, průměry prutu,...).

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

QIU, Chunlei, Sheng YUE, Nicholas J.E. ADKINS, Mark WARD, Hany HASSANIN, Peter D. LEE, Philip J. WITHERS a Moataz M. ATTALLAH. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A [online]. 2015, vol. 628, s. 188-197 [cit. 2015-03-24].

ABELE, Eberhard, Hanns A. STOFFREGEN, Klaus KLIMKEIT, Holger HOCHÉ a Matthias OECHSNER. Optimisation of process parameters for lattice structures. Rapid Prototyping Journal [online]. 2015, 21(1), 117-127 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0096. ISSN 1355-2546.

YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN a David RAYMONT. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2012, 62, 32-38 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002. ISSN 08906955.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Selective Laser melting (SLM) patří mezi aditivní technologie. Postupným nanášením vrstev prášku a tvorbou struktury pomocí laserového paprsku umožňuje tvořit tvarově složité díly, například mikrostruktury.

V této práci je zkoumán potenciál nových strategií tisku, které by mohly vést ke kvalitní výrobě dílů a získání lepší struktury bez porozit.

Na základě analýzy současného stavu byl utvořen software pro výpočet trajektorií laseru při využití nové strategie tisku, porovnány procesní parametry získané z odborného článku a z experimentů na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Na jejich základě byla navržena testovací sada s novými parametry, umožňující další výzkumy v této problematice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, aditivní technologie, procesní parametry, strategie tisku, mikroprutová struktura, AlSi10Mg.

ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) belongs to additive technologies. Progressive adding of layers of material powder and creating the structure with laser beam allows to create components with complex shapes, for example microstructures.

This thesis explores potential of new printing strategies, which could lead to good melting of printed component and reaching to better structure without porosities.

Based on analysis of actual state, software for calculation of laser trajectory was made with use of new printing strategy. Also, process parameters obtained from technical articles and from experiments made on Institute of Machine and Industrial Design on Faculty of Mechanical Engineering BUT in Brno were compared. This comparison led to suggestion of test set of components with new parameters and strategies. This set could lead to new researches in this issue.

KEYWORDS

Selective laser melting, additive manufacturing, process parameters, printing strategy, lattice structures, AlSi10Mg.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MORAVČÍK, J. *Vývoj procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií kovového 3D tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vrána.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci *Výzkum procesních parametrů pro výrobu strukturovaného materiálu technologií Selective Laser Melting* jsem vypracoval samostatně, pod dohledem vedoucího bakalářské práce Ing. Radka Vrány. Zároveň prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 18. května 2017

.....
Podpis autora

"This bachelor thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development center built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and, in the follow-up sustainability stage, supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by financial means from the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu práce, Ing. Radku Vránovi, za rady, připomínky, pomoc a trpělivost při pomoci s tvorbou a zpracováním této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat mé přítelkyni za podporu, trpělivost a toleranci komplikací vzniklých vlivem tvorby této práce.

OBSAH

OBSAH	13
1 ÚVOD	14
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1. Vliv procesních parametrů na strukturu a vlastnosti materiálu vyráběného metodou SLM	15
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	26
3.1 Analýza problému	26
3.2 Cíl práce	27
4 MATERIÁL A METODY	28
4.1 Selective laser melting	28
4.2 SLM 280 HL	28
4.3 Prášek AlSi10Mg	29
5 VÝSLEDKY	30
5.1 Popis programu	30
5.1.1 Základní vstupní a výstupní veličiny programu	30
5.1.2 Určení konkrétních řezů pro výpočet trajektorií laseru	33
5.1.3 Výpočet obvodů pro jednotlivé řezy	34
5.1.4 Ostatní oblasti programu	37
5.2 Analýza současné energie	38
5.2.1 Aplikace vstupních parametrů do vytvořeného programu	38
5.2.2 Hledání závislosti energie na porozitě a rozměrech z poskytnutých dat	40
5.3 Návrh nové strategie pro všechny řezy	41
5.3.1 Strategie postupného vyplňování elipsami	41
5.3.2 Strategie Centerline	42
5.3.3 Strategie řízeného šrafování	42
5.3.4 Odlišnost strategií pro jednotlivé řezy	42
5.3.5 Návrh strategie a procesních parametrů, testovací sady	45
6 DISKUZE	47
7 ZÁVÉR	48
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	50
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	51
SEZNAM TABULEK	52
SEZNAM PŘÍLOH	53

1 ÚVOD

Aditivní technologie jsou převratnou metodou výroby tvarově složitých součástí v moderním strojírenství. Umožňují modelovat a tvořit díly komplexních struktur, jakých by konvenčními metodami nemohlo být dosaženo z důvodu technologických omezení (viz obr. 1.1). Na rozdíl od standardních procesů dochází při použití aditivních technologií k postupnému přidávání (adici) materiálu a jeho formování. Do pole strojírenských technologií tak přichází možnost tvořit geometricky složité díly, které dokáží disponovat téměř stejnými vlastnostmi než součásti vyráběné konvenčními metodami.

Tato metoda vychází z principu bližšímu přírodním způsobům tvorby. Na postupně nanášené vrstvy se tvoří tvar výsledného dílu, jehož strukturu a obsah lze upravovat a tím vylepšovat. Je možné budovat díly zcela vyplněné, stejně jako díly s odlišnou prutovou strukturou, tzv. *Lattice structure*. Tím lze dosáhnout snižování hmotnosti při zachování mechanických vlastností.



Obr. 1.1 Ukázka strukturovaného materiálu tvořená metodou SLM. [1]

Tvorba dílů aditivními technologiemi je multidisciplinární věda zahrnující obory prostorového modelování, programování, konstrukce dílu, materiálového inženýrství a procesního inženýrství. Základem „kovového tisku“ jsou především vstupní procesní parametry, které významně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti a tvar dílů. Tato práce bude zaměřena na vývoj nové strategie výroby mikroprutové struktury pro odstranění porozity v prutech a zlepšení geometrické přesnosti struktury.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

Pro danou problematiku byly voleny aktuální vědecké publikace s tematikou týkající se především procesních parametrů a možností ovlivnění výsledné struktury a vlastností materiálu AlSi10Mg při použití metody SLM.

2.1. Vliv procesních parametrů na strukturu a vlastnosti materiálu vyráběného metodou SLM

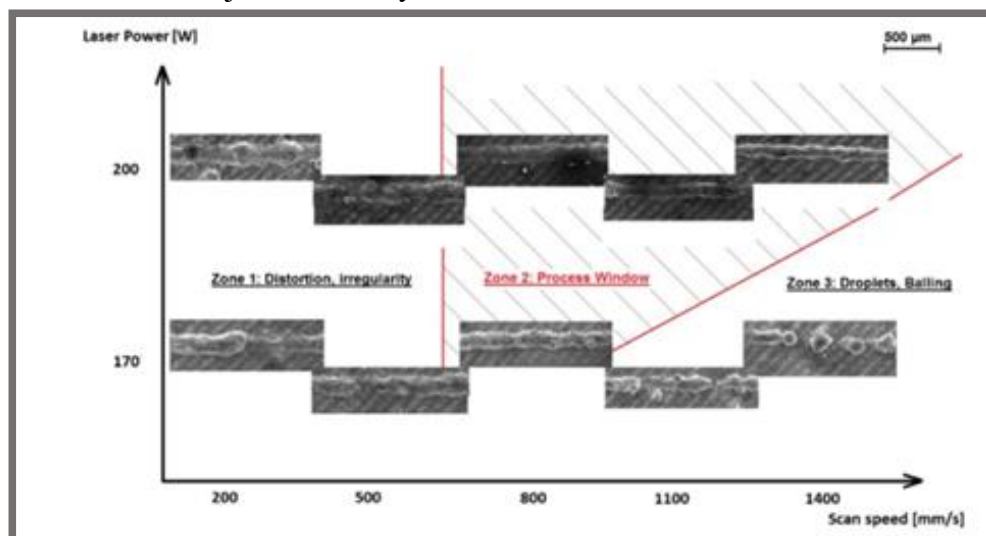
2.1

Kempen et al. [2] se zabývali optimalizací procesních parametrů pro tisk dílů z materiálu AlSi10Mg s rozložením částic 15 – 45 μm metodou SLM. Pomocí experimentálních metod se pokoušeli stanovit pásmo optimálních procesních parametrů pro výrobu součástí metodou SLM.

Testovaná oblast procesních parametrů byla široká, výkon laseru v rozsahu 170 – 200 W, skenovací rychlost 800 – 1600 mm.s^{-1} . Tloušťka nanášené vrstvy byla konstantně na 30 μm , vzdálenost mezi dráhami laseru 105 μm . Hustota byla měřena pomocí Archimédovy metody. Díly byly váženy na vzduchu a poté v etanolu.

K určení pásma optimálních parametrů byla využita metoda tvorby jedné trasy laseru na nanesené vrstvě, tzv. *Single track*. Vyhodnocením jedné dráhy laseru lze zjistit mnoho užitečných informací o tvorbě a stabilitě tavné lázně, například o velikosti lázně, tvaru lázně a její smáčivosti, hloubce průvaru. Pro určení optimálních parametrů byly stanoveny základní premisy, které musí oblast ovlivněná laserovým paprskem splňovat:

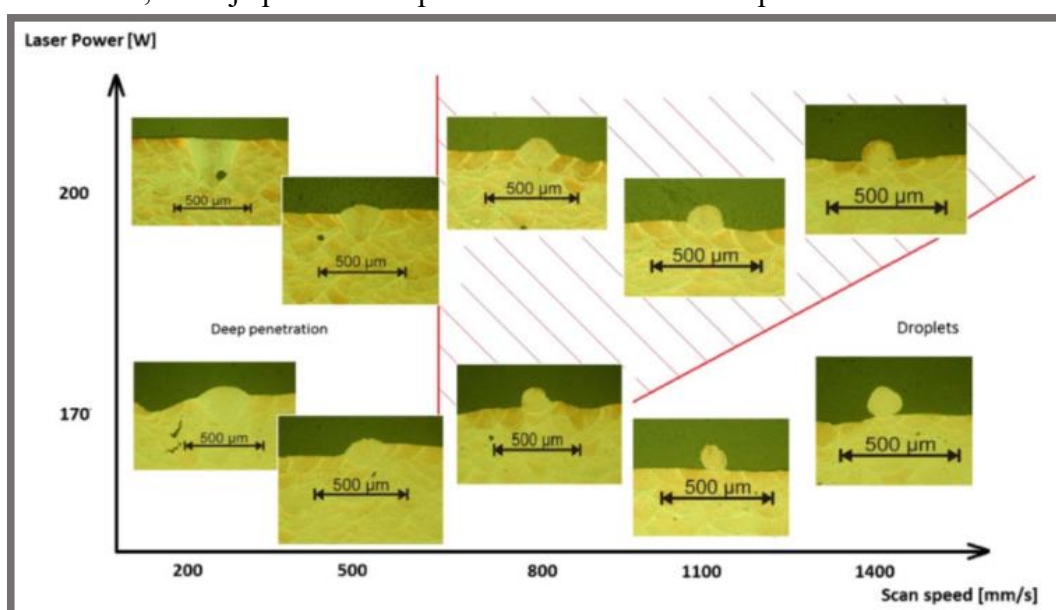
- 1) Trasa laseru musí být nepřerušovaná k zamezení vzniku pórů a nerovnoměrností v dílu.
- 2) Paprsek laseru musí slabě prostoupit i předešlou vrstvou materiálu, aby došlo k dobrému spojení mezi různými vrstvami (dobré smáčivosti předcházející vrstvy).
- 3) Trasa laseru musí mít dostatečnou hloubku (zhruba polovinu šířky trasy) k možnosti tvořit trojrozměrné díly.



Obr. 2.1 Definice oblasti optimálních procesních parametrů metodou Single track. [2]

Vzhled jednotlivých tras laseru a jejich dopadů na povrch vrstvy je znázorněn na obrázku 2.1., šrafovaná oblast je definovaná jako oblast optimálních procesních parametrů.

Podobné jevy lze pozorovat při analýze struktury v řezu materiálem. Při vysoké hodnotě jednotkové energie (hodnoty v $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$) dochází k vysokému průniku do předcházejících vrstev a dochází zde k částečnému vypařování. Tavná lázeň přechází z fáze přesunu materiálu, tzv. *Conduction* módu do vzniku struktury připomínajícího klíčový otvor, tzv. *Keyhole* módu, který je známý a používaný v terminologii svařování laserem. Když je intenzita laseru dostatečně vysoká, tvoří se hluboko pronikající dutina páry. Stabilita této dutiny je dána rovnováhou sil tvořících dutinu (tvorba plazmy, odsun materiálu) se silami uzavírajícími dutinu (gravitace, povrchové napětí). Malá změna skenovací rychlosti nebo teploty může vést k nestabilitě, která je příčinou rozpadu tavné lázně a vzniku pórů.



Obr. 2.2 Definice oblasti optimálních procesních parametrů dle struktury materiálu v řezu. [2]

Oblast optimálních procesních parametrů je vyznačena na obrázku 2.2, kde jsou vyobrazeny jednotlivé struktury tvořené tiskem s odlišnými procesními parametry. Lze očekávat, že k dosažení optimálních procesních parametrů je potřeba dosáhnout energie v rozsahu $150\text{--}250 \text{ J}\cdot\text{m}^{-1}$.

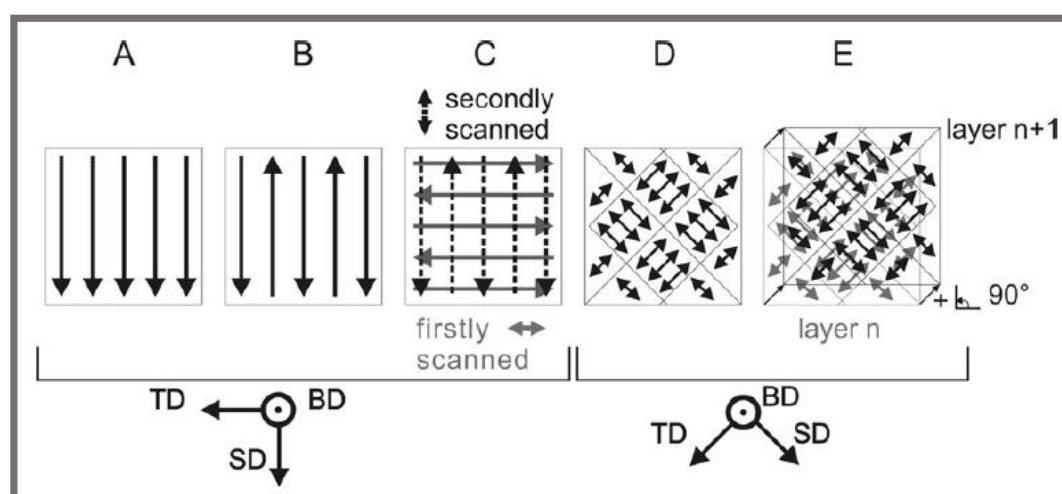
Thijs et al. [3] se zabývali materiálovými vlastnostmi dílů z materiálu AlSi10Mg vyrobeného metodou SLM s odlišnými procesními parametry. Autoři přináší nový a zajímavý přístup díky elektronové mikroskopii a zobrazovací metodě EBSD. Materiál AlSi10Mg popsali jako užitečný pro tisk z důvodu dobré svařitelnosti, vytvrditelnosti a tepelné vodivosti. Důležitou vlastností je i struktura slitiny Al-Si, která se blíží k eutektické, což vede k výrazně nižší teplotě tavení materiálu. Přídavek hořčíku v malém procentu vede k tvorbě precipitátu Mg_2Si , který omezuje degradaci materiálu stárnutím.

Bylo vyrobeno pět testovacích vzorků o rozměrech $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$. Rozložení částic v materiálu bylo $20\text{--}60 \text{ }\mu\text{m}$. Tisk byl proveden v inertní atmosféře argonu s přetlakem $10\text{--}12 \text{ mbar}$ a úrovní kyslíku v rozsahu $0,1\text{--}0,3\%$. Optimální procesní parametry byly stanoveny z předešlé studie a zaznamenány do tabulky pro každý typ vzorku, viz tab. 2.1. Rozdíl byl v tloušťce nanášené vrstvy, tzv. *Layer thickness*, která v tomto případě byla $30 \text{ }\mu\text{m}$.

Tab. 2.1 Procesní parametry a skenovací strategie tisknutých vzorků. [3]

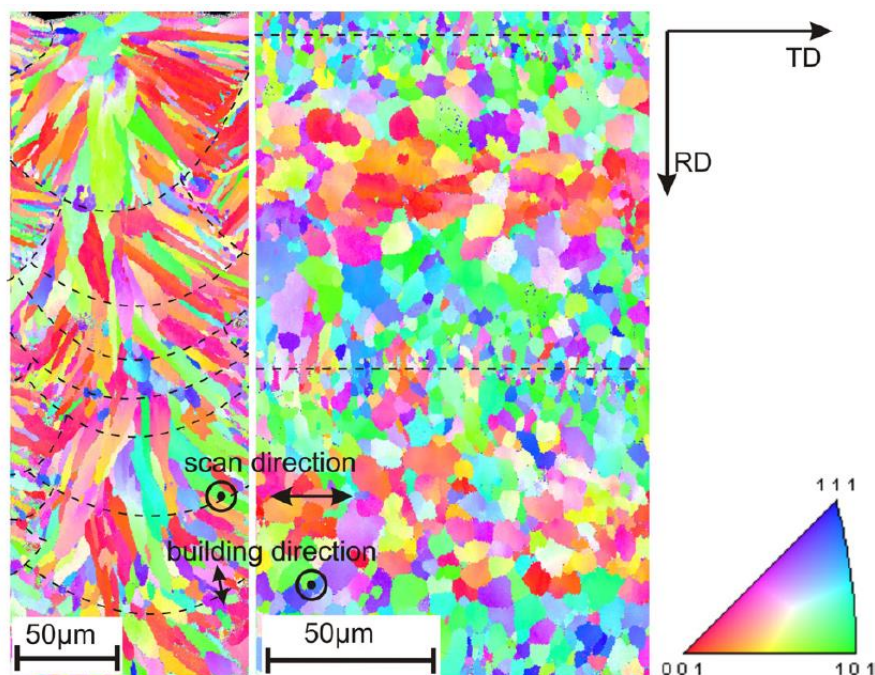
Sample	A	B	C	D	E
Scanning parameters					
Laser power (W)	200	200	200	200	200
Scanning speed (mm s^{-1})	1400	1400	1400	1400	1400
Hatch spacing (μm)	105	105	105	105	105
Scanning vector bidirectional (Bi) or unidirectional (Uni)	Bi	Uni	Bi	Bi	Bi
Rotation between layers	0°	0°	90° ^a	90°	90°
Islands $5 \times 5 \text{ mm}^2$	No	No	No	Yes	Yes
Shift 1 mm	No	No	No	No	Yes
Relative Archimedes density (%) ($\rho_{\text{theor}} = 2.68 \text{ g cm}^{-3}$)	99.0	98.9	99.4	98.2	98.7
Texture index (according to Eq. (1))	1.974	1.982	1.266	1.127	1.079

Mezi testovanými strategiemi byly použity metody jednosměrného tisku (A), střídání jednosměrného a zpětného tisku (B), kombinace jednosměrného tisku a tisku posunutého o 90° (C), skenovací strategie „island scanning“ (D) a obdobné strategie s posunem následující vrstvy o 1 mm v ose x i y (E). Metody jsou schematicky zobrazeny na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Skenovací strategie použité pro vzorky. SD = směr skenu, BD = směr vrstvení, TD = transversální směr. [3]

Nový pohled na strukturu a vlastnosti přinesla metoda difrakce odražených částic elektronů, zkráceně EBSD. Zachycuje směry krystalových rovin a tím pádem orientaci zrn. Odlišné směry umožňují takřka dokonalé vykreslení různých zrn a mohou detailně zachytit teplem ovlivněnou oblast, hrubost zrn a jejich změny v závislosti na vzdálenosti od paprsku laseru. Na obr. 2.4 se nachází snímky pořízené metodou EBSD z pohledu shora a z pohledu řezu.



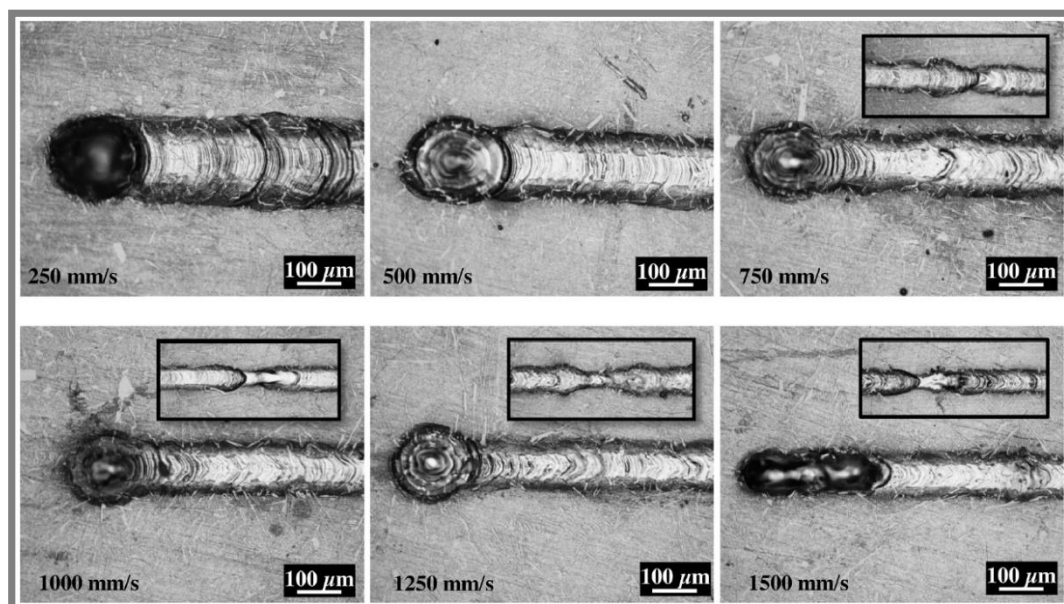
Obr. 2.4 Snímky zachycující krystalovou orientaci zrn pomocí metody EBSD. [3]

Oxidy v materiálu vznikají i navzdory velmi malému množství kyslíku v atmosféře tiskové oblasti. Vzniku oxidů hliníku se přisuzuje případná obtížnost skenování (oxidy hliníku jsou tvrdé), ale s dostatečným výkonem laseru by mělo dojít k proražení i většího množství oxidů ve struktuře materiálu. Díly ve studii byly tvořeny s výkonem laseru 200 W, byl zajištěn rozpad vzniklých oxidů a došlo tak k vytvoření dílů s téměř úplnou hustotou. Přesto se pár drobných částic oxidů stále nachází v jejich struktuře. Dále však nebyla oxidům věnována pozornost z důvodu předmětu studie.

Díky dobrému rozptýlení křemíku ve fázi hliníku dosahuje materiál vysokých tvrdostí, které dokonce převyšují tvrdost slévarenských slitin hliníku odlévaného vysokotlakým litím.

Aboulkhair et al. [4] se zabývali vlivem skenovací rychlosti na výslednou strukturu materiálu AlSi10Mg při tisku metodou SLM. Zaměřili se především na tvorbu čar laseru na jedné vrstvě, tzv. *Single tracků*, ve výsledné struktuře poté zkoumali fenomén tvorby pevných kuliček ve struktuře materiálu, tzv. *balling* efektu. Zároveň stanovili, že příliš vysoká velikost nanášené vrstvy vede k nedokonalostem a nepřesnostem.

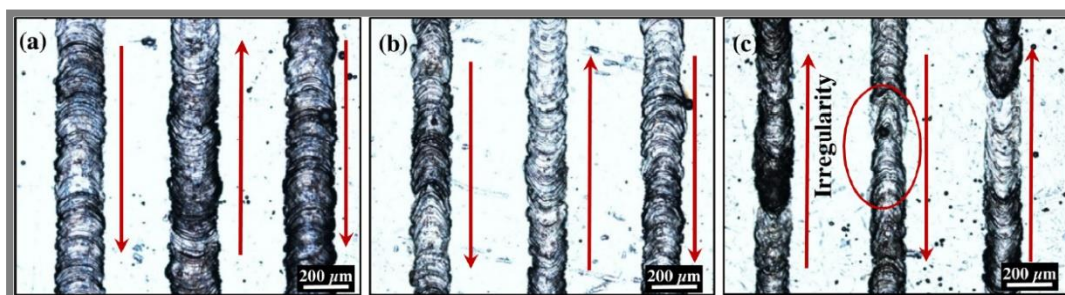
Pro *Single tracky* byl zvolen jako základní materiál Al-Si12, který je používán jako materiál na formy na odlitky. Skenovací rychlosti v rozsahu 250–1500 mm.s⁻¹ a s krokem 250 mm.s⁻¹. Výkon laseru byl konstantně nastaven na 100 W. Vzniklo tak šest snímků trajektorií laseru na nanášené vrstvě materiálu. Byla zkoumána šířka tavné lázně, její celistvost a rovnoměrnost. Zkoumané jevy se nachází na obr. 2.5.



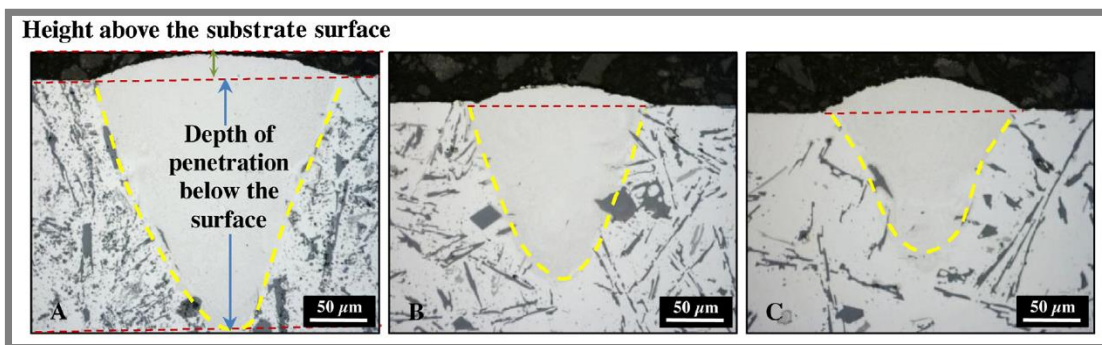
Obr. 2.5 Trajektorie laseru vytvořené metodou Single track s předepsanými skenovacími rychlostmi. [4]

Ze snímků je zřejmé, že šířka i hloubka trasy se s rostoucí skenovací rychlostí snižuje. Nerovnoměrnosti a neplynulé oblasti se začínají vyskytovat u skenovacích rychlostí nad 500 mm/s. Na snímcích jsou vloženy další ukázky tras s použitím ještě větších skenovacích rychlostí.

V dalších experimentech je použitý materiál AlSi10Mg. Skenovací rychlosti byly nastaveny v rozsahu 250–750 mm/s. Snímky s jednotlivými vzorky se nachází na obr. 2.6. Pro jednotlivé vzorky byly zároveň vytvořeny snímky při pohledu v řezu, viz obr. 2.7.



Obr. 2.6 Trajektorie laseru na materiálu AlSi10Mg. Skenovací rychlosti u jednotlivých snímků jsou 250 mm/s (a), 500 mm/s (b) a 750 mm/s (c). [4]

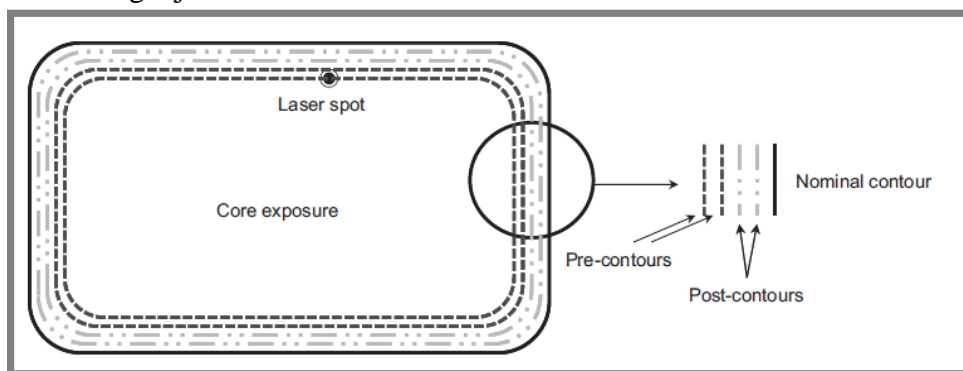


Obr. 2.7 Trajektorie laseru na materiálu AlSi10Mg z pohledu řezu. Skenovací rychlosti u jednotlivých snímků jsou (zleva) 250 mm/s, 500 mm/s a 750 mm/s. [4]

Ze snímků je patrné, že tavená vrstva tvoří spíše kuželový, než sférický tvar, což autoři považují za projev *Keyhole efektu*. Rozměry drah se snižovaly téměř lineárně s rostoucí skenovací rychlostí. Především u vyšších skenovacích rychlostí docházelo ke vzniku nerovnoměrností a nežádoucích prvků ve struktuře materiálu.

Abele et al. [5] testovali odlišné procesní parametry než ty, které byly definovány jako standardní parametry pro nerezovou ocel 1.4542 s rozložením částic 28 – 41 µm. Přitom ověřovali výkon laseru a průměr, do jakého laserový paprsek ovlivňoval materiál. Výkon laseru byl měněn, stejně jako skenovací rychlost.

Nově do tisku metodou SLM připojili změnu trajektorie laseru jako důležitý parametr ovlivňující výslednou strukturu a vlastnosti konečného produktu. Trasu paprsku posunuli z kontury směrem ke středu a nové trasy nazvali jako pre-kontury, post-kontury a nominální konturu, čímž rozšířili počet tras až na čtyři. Schéma použité strategie je zobrazeno na obr. 2.8.

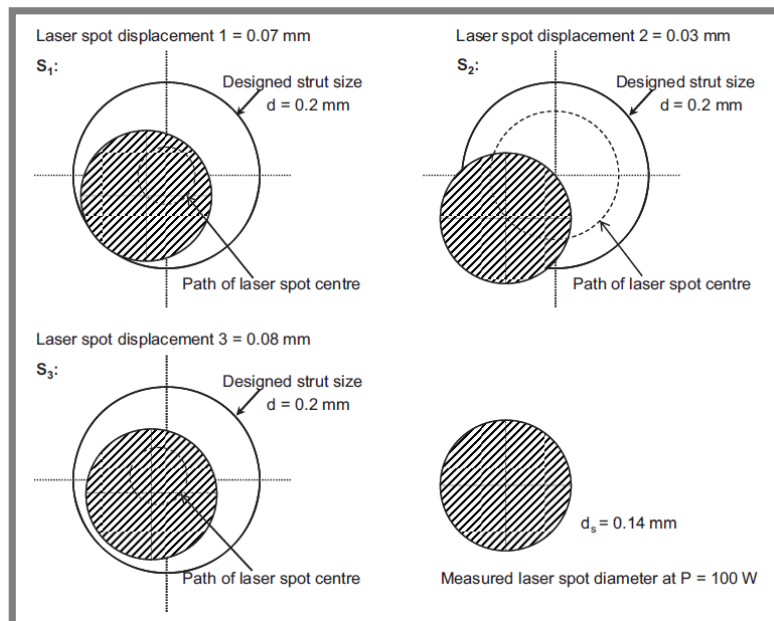


Obr. 2.8 Trajektorie laseru u zkušebních vzorků tisknutých metodou SLM. [5]

Trajektorie byly otestovány na třech vzorcích vyrobených se standardními procesními parametry a byla analyzována opakovatelnost tisku. Kombinace různých trasovacích vzorků vedla k delšímu výpočtu a době tisku. Přesto byla nadále očekávána větší rozměrová přesnost, než při využití standardních parametrů a konkrétní trajektorie laseru u menších průměrů prutů. Pro větší pruty by podle předpokladů měla být vhodnější standardní metoda.

Základní veličinou přizpůsobených laserových trajektorií pro prutové struktury je vychýlení laserového paprsku. Paprsek byl modifikován tak, aby změnou ostrosti louče byla umožněna šířka návaru až do 140 μm při výkonu laseru 100 W, což je doporučená hodnota pro daný materiál a standardní parametry. Toto nastavení laseru bylo konstantní pro všechny tisknuté vzorky.

Pro další vzorky byly použity tři různá vychýlení laserových paprsků o velikostech 0,07 mm (S_1), 0,03 mm (S_2) a 0,08 mm (S_3). Schéma pozic laserových paprsků je znázorněno na obr. 2.9, procesní parametry v tab. 2.2.



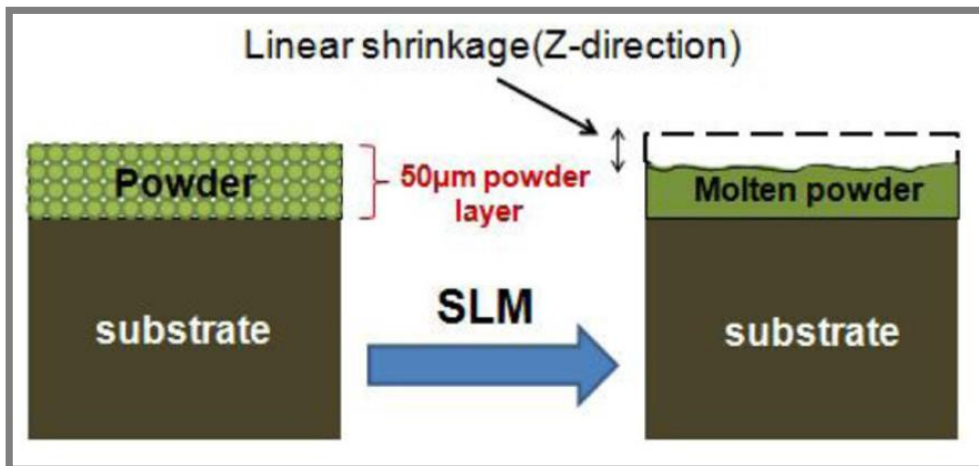
Obr. 2.9 Trajektorie laseru s vychýlením laserového paprsku. [5]

Tab. 2.2 Procesní parametry u zkušebních vzorků tisknutých metodou SLM. [5]

Parameter	n	Laser spot displacement S [μm]	Laser power P [W]	Scan velocity v_s [mm/s]	Linear energy density E_L [J/mm]
Standard value pre-/post-contours (SP)	3	60-140	60	700	0.085 (reference)
S1-v1000	1	70	100	1,000	0.100 (+18%)
S1-v1200	1	70	100	1,200	0.083 (−2%)
S1-v1400	1	70	100	1,400	0.071 (−16%)
S2-v1800	1	30	100	1,800	0.055 (−35%)
S2-v2000	1	30	100	2,000	0.050 (−41%)
S2-v2200	1	30	100	2,200	0.045 (−47%)
S3-v700	1	80	100	700	0.143 (+68%)
S3-v800	1	80	100	800	0.125 (+47%)
S3-v1000	1	80	100	1,000	0.100 (+18%)

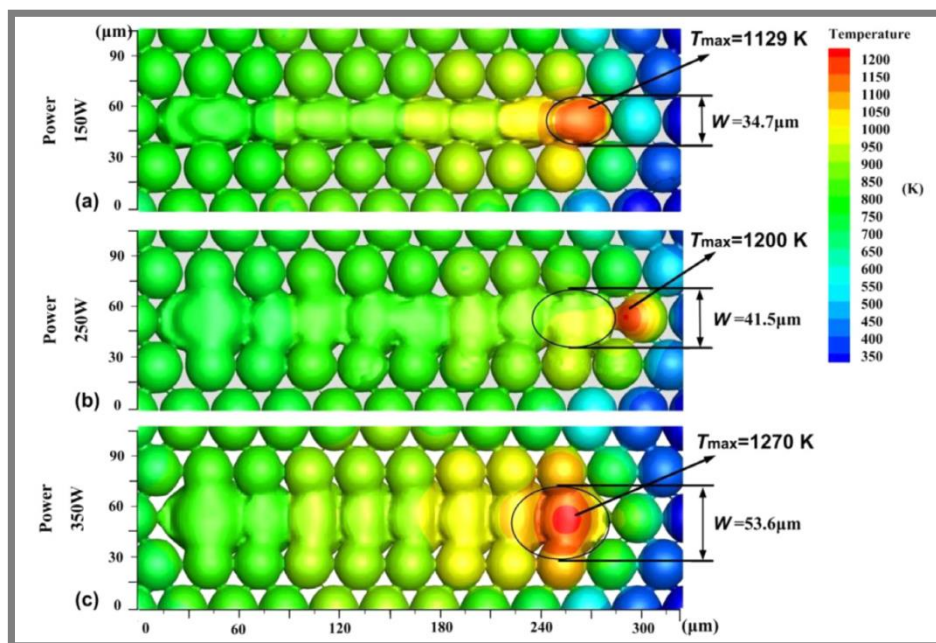
Statistické vyhodnocení vyrobených vzorků vedlo k výsledku, že žádný ze zkušebních vzorků nedemonstruje možnou opakovatelnost tisku touto cestou a základní metoda se standardními procesními parametry dokáže vést k dílům s dostatečnou přesností, dokud mají pruty průměr menší než dvojnásobek průměru laserové louče. Přesto byl ale zjištěn zajímavý objev, a to že se změnou lineární hustoty energie lze změnit velikost tavné lázně přes oblast, kterou ovlivňuje paprsek laseru.

Yu et al. [6] zkoumali procesní parametry z úhlu termických pochodů při tisku metodou SLM. Byl vytvořen 3D model pomocí metody konečných objemů, aby byl zkoumán proces přechodu prášku do jednotného celku pod vlivem různých procesních parametrů během tisku z materiálu AlSi10Mg metodou SLM. Bere se v úvahu značná komplexnost fyzikální interakce mezi práškem a laserovým paprskem. Byly studovány vlivy teplot, rychlostí, povrchové morfologie a zúžení osy Z.



Obr. 2.10 Ukázka zmenšení výšky materiálu po tisku metodou SLM. [6]

Bylo zjištěno, že jak vysoký, tak nízký výkon laseru vede k hrubé kvalitě povrchu a zde se nacházely optimální procesní parametry ($P = 250 \text{ W}$, $v = 400 \text{ mm.s}^{-1}$, $d = 50 \text{ μm}$) pro slitinu AlSi10Mg, aby bylo dosaženo relativně hladkého povrchu a nízké hodnoty zmenšení v ose Z. Slabý výkon laseru nedokáže natavit prášek úplně a vysoký výkon způsobil přílišnou tvorbu taveniny zvanou self-balling (nalepování částic prášku na tvořenou strukturu). Bylo ovšem zajímavé objevit tento teplotně rekonstruktivní fenomén (pomalejší tuhnutí materiálu a zjemnění zrn), který uvolňuje velká residuální napětí díky vlastnímu tepelnému zpracování.



Obr. 2.11 Slinování práškové směsi při různých výkonech laseru. [6]

Z výzkumů byly vyvedeny následující závěry:

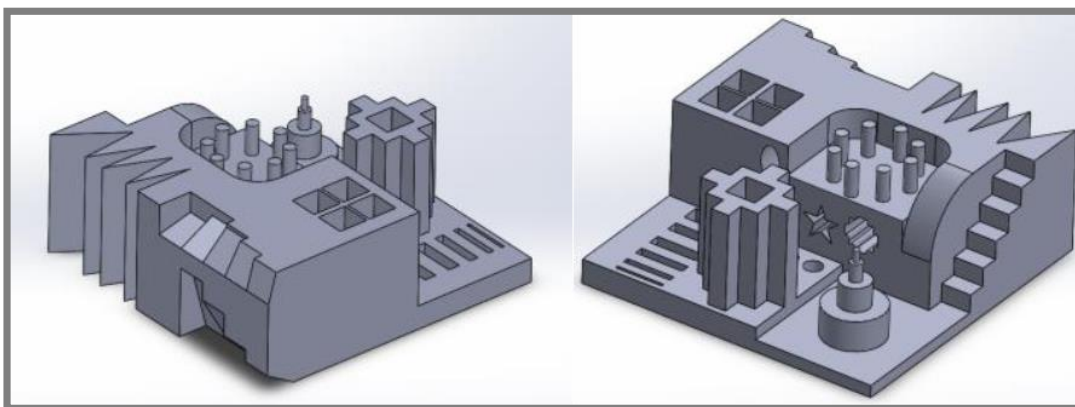
1) Správné zvyšování výkonu laseru může vést ke kompletnímu natavení prášku, zvýšit jeho smáčivost a zlepšit kvalitu povrchu, ovšem příliš vysoké výkony laseru (nad 250W) vedou k porozitě a k balling efektu, který zapříčiňuje horší strukturu povrchu. Nízký výkon laseru nedokáže natavit prášek kompletně a vysoký výkon způsobuje nestabilitu tavné lázně a zmíněný self-balling.

2) Byl objeven fenomén tepelné rekonstrukce, který byl vysvětlen dvěma různými způsoby. Jednou možností je, že uvolnění pro krystaly latentního tepla (teplo potřebné na změnu materiálové fáze) způsobuje zjemnění zrn. Druhým faktorem pak může být velký rozdíl mezi tepelnou vodivostí mezi kovy a atmosférou. Vodivost se výrazně zvyšuje, když se prášek mění v tavnou lázeň. Tato změna může vést k tepelné rekonstrukci.

3) Poměr zúžení osy Z je závislý na výkonu laseru. Vysoký výkon způsobuje vyšší teplotu a viskozita bývá nižší. Nižší viskozita zlepšuje tok taveniny. Tekutý materiál tak snáze protéká z vrchu dopředu a činí každou vrstvu hladší. Jakmile ale výkon laseru přesáhne 250W, poměr zúžení a kvalita povrchu se zhoršují.

4) Delší doba ozáření vede k self-ballingu a ovlivňuje kvalitu povrchu. Dlouhá výdrž taveniny umožňuje tvorbu spousty drobných kuliček snižujících její povrchové napětí. Doporučuje se tedy nastavovat parametry pro co nejmenší dobu ozařování laserem.

Kamarudin et al. [7] zkoumali strukturu povrchu a geometrickou přesnost tisku metodou SLM pro materiál AlSi10Mg. Využili k tomu součást s různými tvary, vychýlenými rovinami, válcovými a dalšími prvky, které rozmístili do všech tří rovin, které jsou v tisku metodou SLM zásadní. Výsledek tisku pak měřili na 3D měřicím centru a pomocí drsnoměru. Vizualizace vytisknutého modelu je zachycena na obr. 2.12.



Obr. 2.12 Model vytvořený pro testování komplexních tvarů pro tisk metodou SLM. [7]

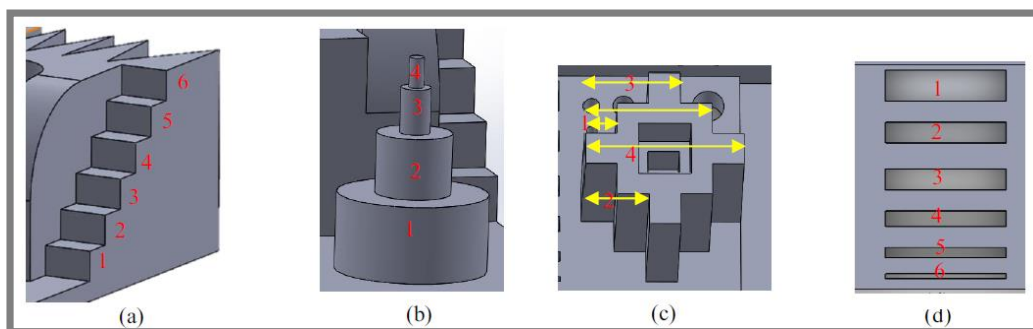
Pro měření drsnosti byly využity roviny nakloněné v různých úhlech od horní vodorovné roviny a podstavy. Rovněž byla měřena i boční stěna. Výsledky drsnosti spolu s procentuální odchylkou od modelem definovaných rozměrů jsou uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Hodnoty struktury povrchů vyrobených 3D tiskem metodou SLM. [7]

No	Average	SLM AlSi10Mg						
		Top			Bottom			Side
		45°	60°	75°	45°	60°	75°	
1	Ra (μm)	3.35	2.28	3.43	9.20	8.32	7.19	2.29
2	Rz (μm)	15.05	12.16	15.63	42.16	43.61	34.96	11.45

Spodní měřené plochy (vodorovné) vykazují vyšší drsnost povrchu, což je přisuzováno tepelným pochodům při tisku dalších vrstev. Byly zmíněny i další faktory, mezi něž patří velikost částic prášku, tloušťka nanášené vrstvy a parametry laseru. Klesající drsnost s úhlem blížícím se k rovnoběžnému k základní rovině je zdůvodněna technologií tisku, tedy nanášením jednotlivých vrstev prášku na sebe.

Pro měření geometrické přesnosti byly na součásti vybrány čtyři oblasti, které jsou znázorněny na obr. 2.13. Byla měřena výška schodů (a), průměr válce (b), vzdálenost hran od boční roviny útvaru (c) a šířka otvorů (d). Výsledky jednotlivých oblastí byly zaznamenány do tab. 2.4, 2.5, 2.6 a 2.7.

**Obr. 2.13** Zvolené oblasti a měřené rozměry pro určení geometrické přesnosti. [7]**Tab. 2.4** Výsledky rozměrových měření pro variantu „a“. [7]

Stairs No.	1	2	3	4	5	6
Designed Dimensions(mm)	3.000	6.000	9.000	12.000	15.000	18.000
Reading 1	3.044	5.986	9.018	12.083	15.104	18.127
Reading 2	3.011	5.996	9.042	12.085	15.126	18.184
Reading 3	3.038	5.996	9.026	12.063	15.091	18.194
Mean Value	3.031	5.992	9.028	12.077	15.107	18.168
Deviation (%)	-1.470	0.240	-0.190	-0.690	-0.690	-0.710

Tab. 2.5 Výsledky rozměrových měření pro variantu „b“. [7]

Cylinder No.	1	2	3	4
Designed Dimensions in mm	10	5	1.5	0.5
Reading 1	9.854	4.898	1.460	0.432
Reading 2	9.862	4.892	1.460	0.451
Reading 3	9.871	4.897	1.470	0.442
Mean Value	9.862	4.896	1.460	0.442
Deviation (%)	1.380	2.080	2.530	11.660

Tab. 2.6 Výsledky rozměrových měření pro variantu „c“. [7]

Designed Dimensions (mm)	1	2	3	4	5
Reading 1	2.989	5.945	8.887	11.865	14.876
Reading 2	2.997	5.976	8.879	11.880	14.866
Reading 3	2.990	5.974	8.876	11.878	14.883
Mean value	2.992	5.965	8.881	11.874	14.875
Deviation (%)	0.270	0.920	1.320	1.050	0.830

Tab. 2.7 Výsledky rozměrových měření pro variantu „d“. [7]

Rectangular Slot Number	1	2	3	4	5	6	7
Designed Dimensions in mm	3	2	2	1.5	1	0.5	8
Reading 1	2.998	2.028	1.994	1.499	1.056	0.426	8.005
Reading 2	2.963	2.037	1.996	1.497	1.032	0.394	7.994
Reading 3	3.002	2.021	1.998	1.493	1.010	0.409	7.974
Mean Value	2.988	2.029	1.996	1.496	1.033	0.410	7.991
Deviation (%)	0.400	-1.450	0.200	0.250	-3.300	18.000	0.113

Z výsledků je zřejmé, že odchylky od základních rozměrů se i navzdory menším velikostem pohybují kolem jednotek procent, což autoři považují za akceptovatelné a využitelné pro budoucí práci s dalšími složitějšími díly. Navíc autoři zmiňují potenciál technologie ve tvorbě tvarově složitých forem na odlitky, jehož možnosti považují vzhledem k malým odchylkám za reálné.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Aditivní technologie a konkrétně metoda SLM umožňuje tisk Nastavení optimálních procesních parametrů povede k dosažení rovnováhy sil v průběhu tisku metodou SLM. Termické a materiálové pochody probíhající během tisku lze popsat rovnicemi pro vedení tepla, jejichž řešení by vedlo k úplné kontrole nad výrobou dílů touto cestou, jejich složitost a počet neznámých a proměnlivých proměnných ale zatím nepřináší možnost jiného přístupu, než optimalizací používáním různých kombinací procesních parametrů.

Autoři [7] zkoumali přesnost tisku v různých úhlech a tvarových náročnostech z hlediska geometrické přesnosti vůči modelu a zároveň zkoumali drsnost povrchu získanou po tisku. Dokázali tak, že metoda SLM lze využít k výrobě prakticky přesných dílů s relativně nízkou drsností povrchu, a poukázali na několik úhlů, u nichž nastala odchylka větší, než u ostatních, kde byla prakticky minimální.

Autoři [6] zkoumali technologii tisku metodou SLM z hlediska termických pochodů a jejich vlivu na zmenšení nanesené vrstvy v průběhu tisku. Hlavním účelem bylo vytvořit matematický model chování částic při tisku s různými procesními parametry. Stanovili tak několik termických rovnic a neznámé konstanty a veličiny, které by pro úplné dokončení analýzy. Poukázali však na fenomén tepelné rekonstrukce materiálu při tisku a vliv výkonu laseru na protavení částic prášku a poskytli několik názorných modelových situací a schémat.

Autoři [5] zkoumali vliv vychýlení dráhy laseru od základní kontury se zachováním zbylých procesních parametrů a pokusili se statisticky vyhodnotit opakovatelnost výroby dílů s podobnými výsledky. Odklon dráhy, tzv. *Spot Compensation*, měnili směrem dovnitř i ven a z jejich výpočtů došli k předpokladu, že využití standardních procesních parametrů je dostačující pro tvorbu dílů s velikostí prutu dvojnásobně větší, než je průměr laserové louče. Je zde tedy potenciál ve využití standardních procesních parametrů pro nové strategie tisku.

Autoři [4] měnili na rozdíl od autorů předešlého článku měnili skenovací rychlost a zkoumali její vliv na strukturu výsledného materiálu a na kvalitu tavení materiálu laserovým paprskem. Výsledkem bylo zjištění, že střední až vyšší skenovací rychlosti ($500 - 750 \text{ mm.s}^{-1}$) vedou ke kvalitnějšímu tvaru a celistvosti nataveného prášku, ale zároveň mohou vést ke vzniku porozit a nerovnoměrných struktur v materiálu.

Autoři [3] přistoupili k problematice 3D tisku z hlediska krystalových soustav a rovin a zkoumali jejich orientaci pomocí metody difrakce zpětně odražených elektronů. Dokázali tak vyobrazit jemnost zrn a hloubku, do jaké tepelné pochody laseru při tisku dokáží ovlivnit strukturu a vlastnosti konečného produktu. Zároveň testovali několik strategií tisku a dokázali tak, že otáčení laserového paprsku v příliš velkých úhlech od předešlé vrstvy může vést ke vzniku pórů a odchylek v hrubosti zrn.

Autoři [2] Se pokusili stanovit oblast procesních parametrů, při kterých lze vytvořit díly s nejlepší možnou tvarovou i geometrickou přesností. Podobně jako předešlí autoři volili metodu *Single Track*. Z dostupných dat vyplývá skutečnost, že tvorba součástí pomocí 3D tisku závisí na silové rovnováze mezi vnějšími a vnitřními vlivy v průběhu tisku a jakákoliv menší změna může vést ke vzniku vad materiálu či dokonce k nedotvoření tisknutého materiálu.

Autoři článků stanovovali procesní parametry, mechanické vlastnosti a strukturu materiálu při tisku metodou SLM, žádný z nich však nezohlednil přímo trajektorii aplikovanou na tvorbu mikroprutových struktur. Pro další postup je potřeba zkoumat další možnosti trajektorií laseru při tisku a jeho parametrů pro optimální dodání energie do soustavy. Zamezí se tak tvorbě porozit, uzlů, příliš velkým průvarem, kolísání průměru prutu a vzniku významné drsnosti na spodní straně prutu (nalepování částečně nataveného prášku).

Pro analýzu různých trajektorií laseru bude užitečné utvořit základní software, v jehož prostředí bude možné měnit dráhy laseru a jejich množství na základě šířek návaru a zjistit tak změnu energií a odhadovat dopad různých procesních parametrů při různých trajektoriích laseru. V budoucnu by mohl být rozšířen i o predikci porozity a přesnosti výroby.

3.2 Cíl práce

3.2

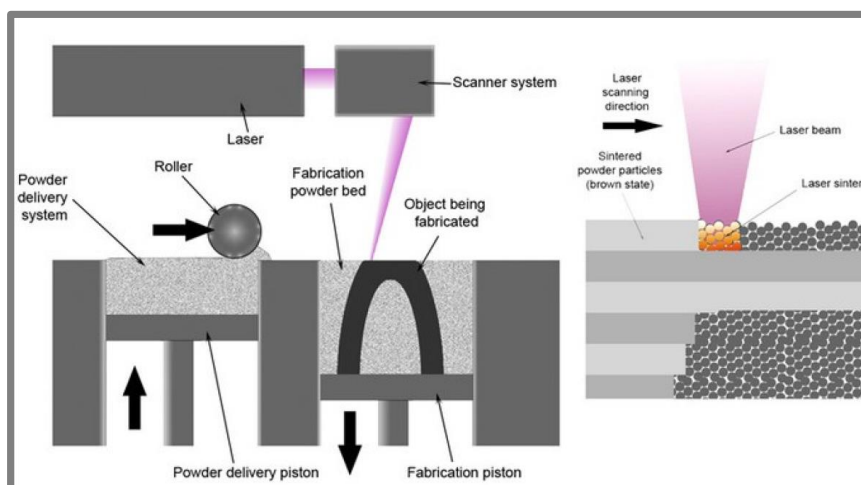
Hlavním cílem je nalezení vhodné kombinace procesních parametrů a korekčních parametrů pro přesnou výrobu prutů technologií SLM. Dílčí cíle bakalářské práce:

- studium zdrojů zaměřených na danou problematiku
- vyhodnocení již naměřených dat a stanovení závěrů
- vytvoření skriptu v programu excel pro stanovení optimálních procesních parametrů pro základní BCC mikro-prutovou strukturu
- návrh experimentu na základě vytvořeného excelu (počet vzorků, procesní parametry, průměry prutu, ...)

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Selective laser melting

Selective laser melting je metoda tisku, při níž laserový paprsek spojuje částice prášku tepelným působením. Na pracovní plochu je nanесena vrstva prášku o předem stanovené tloušťce a laserový paprsek s daným výkonem prochází skrze prášek podle definované trajektorie určenou rychlostí. Po dokončení všech trajektorií v dané vrstvě je nanесena další vrstva. Takto se postupně tvoří celý díl. Schéma tisku je znázorněno na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Schéma principu technologie Selective laser melting. [8]

4.2 SLM 280 HL

Zařízení SLM 280^{HL} je zařízení umožňující tisk jak v prostředí dusíku, tak v prostředí argonu, což umožňuje výrobu materiálů citlivých na oxidaci. Spektrum materiálů je široké, lze tisknout slitiny titanu, hliníku i nerezových ocelí. Rozměry pracovní plochy jsou 280x280x350 mm³, laser může dosáhnout výkonu až 400 W a rychlostí až 10 m.s⁻¹. Zařízení je zobrazeno na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Stroj SLM 280 HL [9]

4.3 Prášek AlSi10Mg

4.3

Kovový prášek pro technologii tisku SLM je vyráběn metodou *Gas Atomisation*. Kov je roztaven a poté je rozprašován pomocí inertního plynu ve vakuu. Pohyb roztavených částic prášku způsobí ochlazení a tuhnutí, již pevné částice poté přistávají do připravené nádoby. Prášek je po procesu tříděn přesíváním a jsou z něj touto cestou vyřazeny částice s velkými rozměry.

V případě tisku testovací sady bude pravděpodobně použit prášek od společnosti TLS se střední hodnotou 41,4 μm , mediánem 40,7 μm a směrodatnou odchylkou 12,9 μm .

5 VÝSLEDKY

Pro tvorbu programu na nastavování procesních parametrů a trajektorií laseru byl použit software MS Excel. Jeho prostředí umožňuje jednoduše vázat jednotlivé parametry tisku a pomocí podmíněného formátování upozornit na případné nedostatky, které by mohly při nastavování parametrů nastat. Tím lze zamezit zbytečným komplikacím v tisku výsledných dílů a v dalších analýzách problémů při tisku neúplných či nedokonalých dílů.

V souvislosti se stanovením procesních parametrů je potřeba stanovit trajektorii, kterou bude laser při tisku opisovat, aby utvořil mikroprutovou strukturu. Protože je tvorba trajektorie relativně snadno ovlivnitelná, přichází v úvahu tvorba nových strategií tisku, které mohou být efektivnější z hlediska rychlostí, energetické spotřeby, a především výsledné přesnosti a vlastností tisknutých dílů. Podrobnější informace budou rozvedeny v následujících podkapitolách.

5.1 Popis programu

5.1.1 Základní vstupní a výstupní veličiny programu

Základem programu pro nastavování procesních parametrů je list s tabulkou pro nastavení základních parametrů. Uživatel může upravovat pouze vstupní procesní parametry, veličiny vystupující z výpočtu zasazeného do programu jsou chráněny heslem a nelze je tak upravovat a měnit bez vědomí majitele oprávnění. Editovatelné parametry jsou vyznačeny bíle, celé pole laserové strategie je pak znázorněno v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Tabulka vstupních a výstupních parametrů pro výpočet energií

L Power =		W
L Speed =		mm/s
Layer Thick.=		mm
L Time =		s
a=		mm
b=		mm
c=		mm
t=		mm
Track Overlap =		mm
Potřebný počet drah =		(-)
Nastavený počet drah =		(-)
Nonmelted Area a=		mm
Nonmelted Area b=		mm
Neprotavená oblast		(-)
Přetavená oblast		(-)
Plně protavený prut		(-)
Nekonečně malá elipsa		(-)

Žlutě vyznačené veličiny z výpočtu buď vystupují, nebo vstupují, ale může je editovat pouze uživatel spravující soubor. Mezi vstupující a neupravitelné veličiny patří šířka návaru t a překrytí mezi jednotlivými ovlivněnými oblastmi *Track Overlap*, který je defaultně nastaven jako 40% z šířky návaru t . Tyto hodnoty se mohou z vývojem dalších článků měnit a pro tento experiment jsou stanoveny jako $t = 0,3 \text{ mm}$ a $\text{Track Overlap} = 0,12 \text{ mm}$.

Jednou ze vstupních veličin je *Potřebný počet drah*, jejíž výpočet je definován vztahem (5.1)

$$\text{Potřebný počet drah} = \frac{b}{t - \text{track overlap}} [-] \quad (5.1)$$

, kde b je velikost vedlejší poloosy elipsy [mm], t je průměr ovlivněné oblasti [mm] a *Track overlap* překrytí ovlivněných oblastí mezi jednotlivými dráhami laseru [mm]. Tato hodnota působí jako zásadní faktor pro první zjištění, zda bude materiál plně protavený nebo přetavený. Tato hodnota může vycházet jako desetinné číslo a může tak uživateli poskytnout informaci, zda nebude lepší parametry změnit (např. potřebný počet drah 2,7 informuje, že jsou potřeba necelé tři dráhy, lze ale vytvořit jen dvě).

Mezi výstupní veličiny patří nově stanovené veličiny *Nonmelted Area a* a *Nonmelted Area b*. Pro jejich výpočet je zásadní nastavený počet drah a vzdálenosti mezi jednotlivými dráhami laseru. Program postupně odečítá od hlavní a vedlejší poloosy prutu hodnoty ovlivněných oblastí dle počtu drah laseru. Pokud se výsledné hodnoty těchto veličin přiblíží k nule, program vyhlásí v zeleném rámečku informaci o plném protavení prutu. Pokud je alespoň jedna hodnota vyšší než 0,05mm, program upozorní, že může dojít k neprotavení prutu. Pokud je hodnota nižší než -0,05mm, program upozorní na možnost vzniku přetavené oblasti.

Dalším výstupem z programu je informace o možnosti vzniku nekonečně malé elipsy. Při tvorbě vzorků v programu Magics dochází k situaci, kdy program vykreslí v jádru další elipsu, ačkoliv velikost jedné z jejích poloos se blíží k nule. Dojde tak k vytvoření čáry ve středu prutu, což může vést k přetavení prutu. Program tvořený v rámci bakalářské práce je proto vybaven informací, zda jsou všechny elipsy dostatečně velké, aby nedošlo ke vzniku přímky v centru prutu. V případě vzniku přímky bude uživatel upozorněn, že je potřeba počítat s odlišnou trajektorií.

Zásadními výstupy jsou především energie, obvod všech trajektorií laseru v prutu a čas potřebný na vykonání všech trajektorií v prutu. Hodnoty energií a obvodu jsou znázorněny v tab. 5.2.

Tab. 5.2 Tabulka energií a obvodu počítaného pro analýzu strategie tisku.

Obvod dráhy laseru		
o_celkem		mm
Energy		
EVD =		J/mm3
Energy =		J
Linear Energy =		J/mm
Area Energy =		J/mm2

Pro výpočet *obvodu* je využita rovnice (5.2), která je postupně modifikovaná o součet jednotlivých obvodů dle počtu drah.

$$obvod \approx \frac{\pi}{2} \left[a + b + \sqrt{2(a^2 + b^2)} \right] [mm] \quad (5.2)$$

, kde a a b jsou velikosti hlavní a vedlejší poloosy elipsy [mm].

Z energetického hlediska jsou počítány čtyři energie, těmi jsou *Energy Volume Density* (zkráceně *EVD*), *Energy*, *Linear Energy* a *Area Energy*. Energie *EVD* je považovaná za charakteristickou veličinu a počítá se pomocí rovnice (5.3).

$$EVD = \frac{P}{v \cdot b \cdot \text{layer thickness}} [J \cdot mm^{-3}] \quad (5.3)$$

, kde P je výkon laseru [W], v skenovací rychlost [$mm \cdot s^{-1}$] a b je vzdálenost mezi trasami laseru [mm]. *Layer Thickness* je tloušťka nanášené vrstvy, která je pro tento experiment stanovena na 0,05mm.

Energy (zkráceně E) je energie tvořená výkonem laseru v čase, který je potřeba pro tvorbu všech jeho trajektorií. Tuto závislost popisuje rovnice (5.4). Jedná se spíše o informativní hodnotu, která je potřebná pro další charakteristické výpočty.

$$E = P \cdot t [J] \quad (5.4)$$

, kde P je výkon laseru [J] a t je čas tvorby trajektorií laserem [s].

Linear Energy je energie vztažená na jednotku délky trajektorie laserového paprsku. Výpočet je definován rovnicí (5.5).

$$Linear Energy = \frac{E}{obvod} [J \cdot mm^{-1}] \quad (5.5)$$

, kde *EVD* je *Energy Volume Density* [J]. Obvod je trajektorie laseru v prutu [mm].

Area Energy je energie vztažená na povrch prutu tvořeného metodou SLM. Výpočet energie je dán rovnicí (5.6).

$$Area Energy = \frac{E}{S} [J \cdot mm^{-2}] \quad (5.6)$$

, kde S je plocha tvořeného prutu [mm^2].

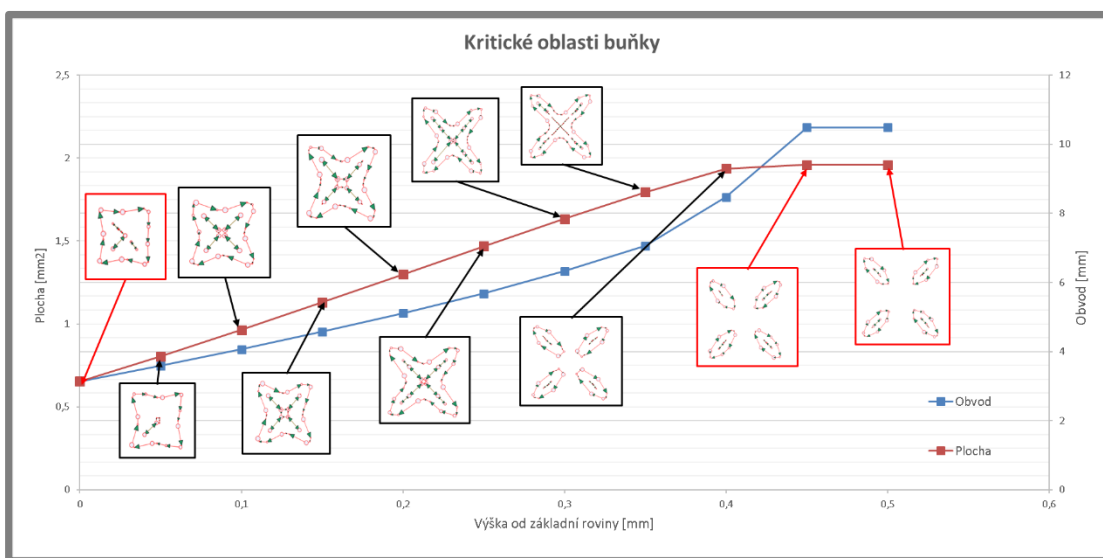
Pro výpočty všech energií je potřeba vypočítat dobu, jakou bude laserový paprsek tvořit definované trajektorie. Čas tisku t je tedy další důležitou veličinou počítanou programem. Výpočet vychází ze vztahu (5.7)

$$t = \frac{o}{v} [s] \quad (5.7)$$

, kde o je obvod všech trajektorií [mm] a v je skenovací rychlost [mm/s].

5.1.2 Určení konkrétních řezů pro výpočet trajektorií laseru

Konkrétní oblasti v buňce, pro něž byla počítána energie, byly zvoleny podle předpokladu kritické změny obvodu a plochy, kterou materiál obsazuje. Ostatní oblasti by byly shodné, nebo by se postupně blížily k těmto mezním stavům v modelu. Po vytvoření programu byla pomocí softwaru Autodesk Inventor simulována tisknutá buňka a vrstvu po vrstvě byly tvořeny řezy. V každém řezu byla vypočtena plocha průřezu buňky a obvod kontury. Z těchto hodnot byla utvořena grafická závislost, do níž byly vneseny ukázky trajektorií laseru v daných vrstvách se zdůrazněním zvolených vrstev, viz obr. 5.1.



Obr. 5.1 Grafické znázornění obvodů a povrchů jednotlivých vrstev

Porovnání vedlo k závěru, že zvolené oblasti jsou blízko místům, u nichž se mění povrch či obvod, nenastává zde však příliš velká změna a mohou být pro tento účel využity oblasti **řez uzlem, přechod mezi uzlem prutů a pruty samotnými a řez prutem**.

V případě buňky o **průměru prutu 0,6 mm** je přechod ve vzdálenosti 0,4 mm od středu uzlu buňky. Řez uzlem je definován v centru buňky a řez prutem může být veden ze kteréhokoliv místa nad koncem uzlu, tedy ve vzdálenosti nad 0,4 mm.

5.1.3 Výpočet obvodů pro jednotlivé řezy

Řez prutem

Řez prutem v BCC struktuře má pro buňku tvar elipsy. Základní veličiny pro řez prutem jsou velikost hlavní poloosy a , velikost vedlejší poloosy b , prostorový úhel α , průměr prutu d a plošný obsah S . Velikost hlavní poloosy lze vypočítat pomocí rovnice (5.8), velikost vedlejší poloosy jako polovinu průměru prutu a plošný obsah pomocí rovnice (5.9). Tyto hodnoty jsou v programu zobrazeny v tab. 5.3.

$$a = \frac{\frac{d}{2}}{\cos((90-\alpha) \cdot \frac{\pi}{180})} \text{ [mm]} \quad (5.8)$$

, kde d je průměr prutu [mm] a α je *prostorový úhel prutu* [°].

$$S = \pi \cdot a \cdot b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (5.9)$$

, kde a a b jsou velikosti hlavní a vedlejší poloosy [mm].

Úhel α je pro buňku BCC definován velikostí 35,26°.

Tab. 5.3 Definice geometrie prutu v programu na výpočet energií.

d=	0,6	mm
α =	35,26	°
a=	0,51967155	mm
b=	0,3	mm
S=	0,489778897	mm ²

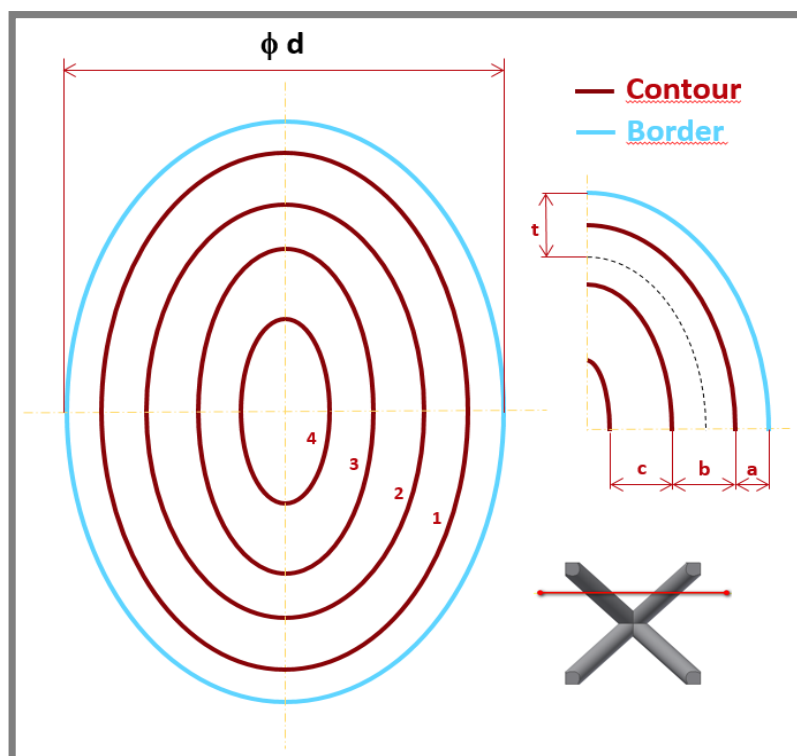
Pro tento případ byla zvolena strategie postupného vyplňování elipsami (viz podkapitola 5.3). Z toho důvodu byl utvořen proces výpočtu obvodu jednotlivých elips umístěný do listu Working. Viz tab. 5.4.

Program podle nastaveného počtu drah odečítá vzdálenost dráhy laseru od kontury, potažmo od předešlé dráhy. Obvod je vypočítán pomocí rovnice platné pro obvod elipsy, viz rovnice (4.2). Takto vypočtené obvody se postupně sčítají. Hodnoty nejmenších poloos jsou poté využity k výpočtu veličin *Nonmelted area*. Od poslední utvořené elipsy se odečte polovina šířky návaru t a program následně vyhodnotí protavenost prutu a pravděpodobnost vzniku nekonečně malé elipsy. Celkový obvod je umístěn do výpočtu energií.

Metoda postupného vyplňování elipsami pro řez prutem je znázorněna na obr. 5.2.

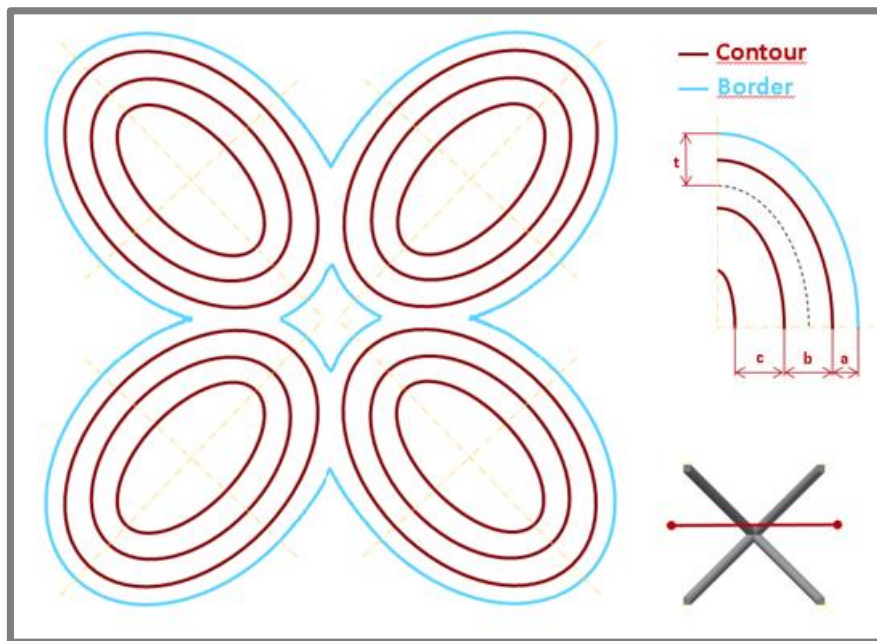
Tab. 5.4 Výpočet obvodu pro oblast řezu úplného prutu.

Počet drah:	1	Možných	1,66666667
Dráha 1	a	0,39967155	
1	b	0,18	
	o	1,884280919	
Dráha 2	a	0	
2	b	0	
	o	0	
Dráha 3	a	0	
3	b	0	
	o	0	
Dráha 4	a	0	
4	b	0	
	o	0	
Dráha 5	a	0	
5	b	0	
	o	0	
Dráha 6	a	0	
6	b	0	
	o	0	
Dráha 7	a	0	
7	b	0	
	o	0	
Dráha 8	a	0	
8	b	0	
	o	0	
Dráha 9	a	0	
9	b	0	
	o	0	
Dráha 10	a	0	
10	b	0	
	o	0	
Obvod celkem		1,884280919	
Nejmenší a		0,39967155	
Nejmenší b		0,18	
Nejmenší obvod		1,884280919	

**Obr. 5.2** Nová strategie tisku tvořená postupně se zmenšujícími elipsami.

Řez přechodem mezi uzlem prutů a pruty samotnými

Při tvorbě řezu přechodem mezi uzlem a pruty bylo zjištěno, že kontura má téměř stoprocentní tvar elipsy, proto je výpočet obvodu pro tento stav totožný. Vzdálenost první trasy laseru od kontury by musela být velmi malá, s čímž se v tomto případě nepočítá a je proto využit obdobný výpočet, jako u předešlého řezu. Pro upřesnění bylo provedeno znázornění přechodu mezi uzlem a pruty, které je zobrazeno na obr. 5.3.

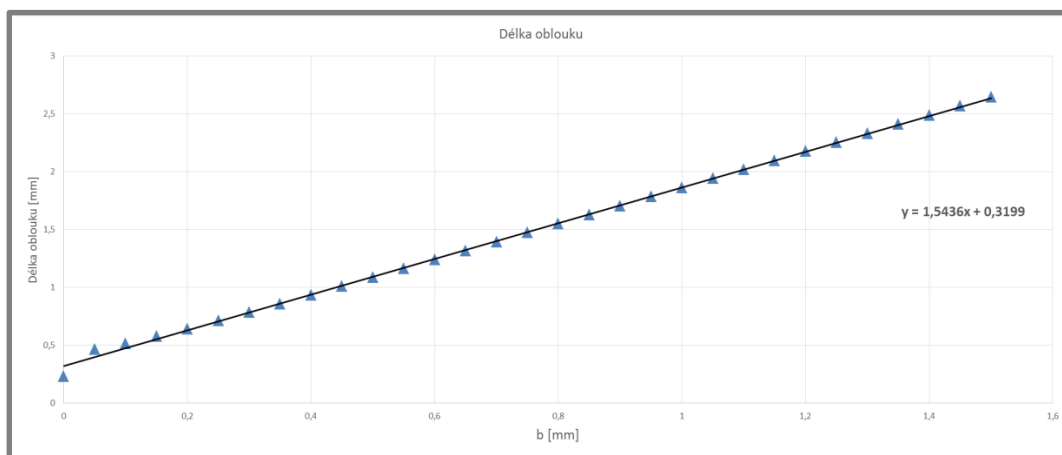


Obr. 5.3 Strategie tisku v přechodu mezi uzlem a pruty.

Řez uzlem

Pro řez uzlem bylo třeba stanovit nový výpočet obvodu. Ačkoliv je i uzel tvořen částmi elipsy, s každou další trasou laseru se jejich procentuální zastoupení mění. Byla proto určena závislost, s jakou se délky jednotlivých částí elips mění, pomocí softwaru Autodesk Inventor. Postupným odsazováním jednotlivých částí elips byla zjištěna jejich délka a byla svázána s velikostí vedlejší poloosy b . Hodnoty byly určeny od velikosti vedlejší poloosy 0 mm až do 1,5 mm s krokem 0,05 mm.

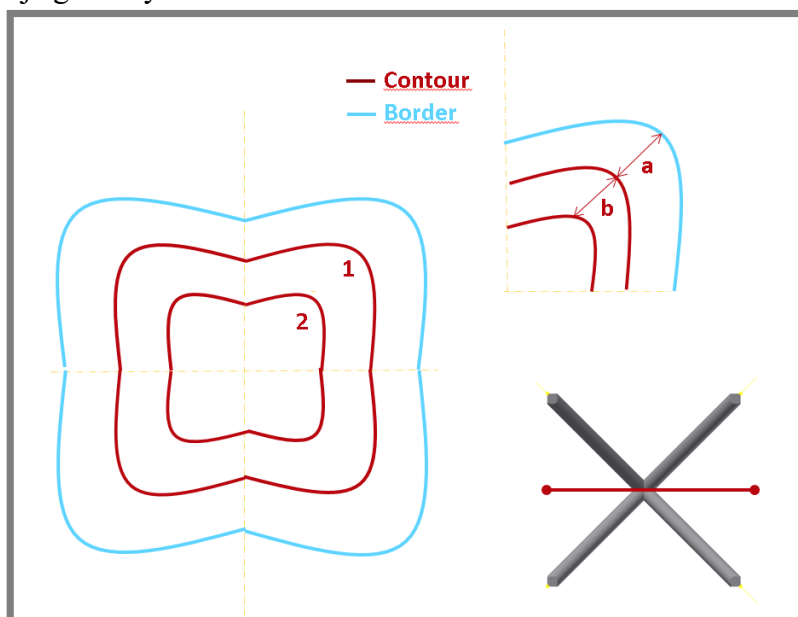
Získané hodnoty byly poté graficky znázorněny a proloženy přímkou. Tato závislost byla využita pro výpočet délky částí elips se znalostí velikosti vedlejší poloosy b a byla zjištěna odchylka od skutečně naměřené hodnoty v softwaru Autodesk Inventor. Hodnoty se v porovnání lišily v rámci setin až tisícín milimetru, jediným rozměrem velikosti vedlejší poloosy s vyšší odchylkou byla hodnota $b = 0,05$ mm, která však pravděpodobně nebude využívána a lze ji tedy zanedbat. Podrobnější hodnoty se nachází v příloze I.



Obr. 5.4 Závislost délky části elipsy na velikosti vedlejší poloosy.

Velmi malé odchylky umožnily aplikovat rovnici pro aproximaci délky oblouku do výpočtu obvodu z předešlých situací a výpočet tak pracuje analogicky. Rovnice je funkční pro průměry prutu do 1,5 mm, vyšší průměr prutu se při výrobě mikroprutových struktur neočekává.

Řez uzlem je graficky znázorněn na obr. 5.5.

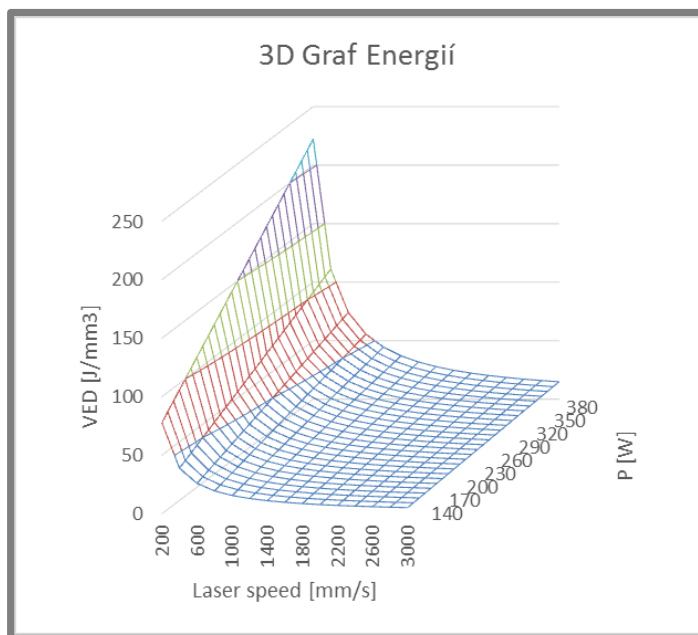


Obr. 5.5 Strategie tisku pro řez uzlem.

5.1.4 Ostatní oblasti programu

5.1.4

Zbylé oblasti souboru tvoří energetická mapa počítající energie pro další možné procesní parametry a grafické znázornění energetické mapy. Velikosti energií jsou barevně odlišené a umožňují tak rychle posuzovat rozdíly oproti aktuálně uvažovaným parametrům. Ukázka grafického znázornění pole energií je znázorněna na obr. 5.6.



Obr. 5.6 3D graf energie EVD v závislosti na procesních parametrech.

5.2 Analýza současné energie

5.2.1 Aplikace vstupních parametrů do vytvořeného programu

Jako vstupní parametry pro program byly zvoleny standardní procesní parametry a parametry navrhované dále v kapitole 5.3.5. Pro dobré srovnání nově navržených procesních parametrů byly tyto hodnoty zadány do vytvořeného excelového programu. Standardní procesní parametry jsou uvedeny v tab. 5.5.

Tab. 5.5 a) Standardní procesní parametry.

Výkon	350 W
Skenovací rychlost	500 mm/s
Spot compensation	0,15 mm
Hatch distance	0,24 mm
Layer thickness	0,05 mm

Tab. 5.5 b) Nově navržené procesní parametry.

Výkon	200 W
Skenovací rychlost	600 mm/s
Spot compensation	0,12 mm
Hatch distance	0,18 mm
Layer thickness	0,05 mm

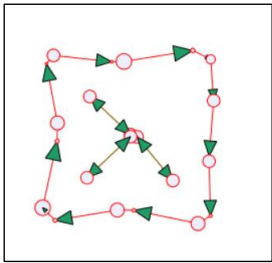
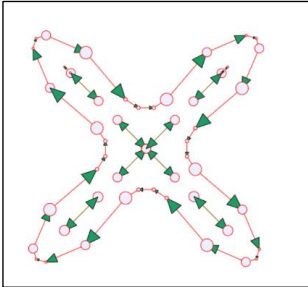
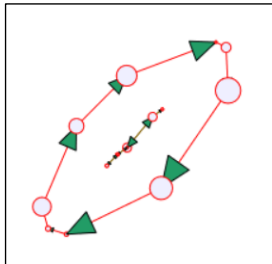
Jednotlivé energie a časy výroby byly zaznamenány do tabulky. Pro ilustraci byla využita buňka o průměru prutu 0,6mm a buňka o průměru 1,5mm. Hodnoty jsou uvedeny pro porovnání se standardními procesními parametry a se dvěma odlišnými průměry v tab. 5.6.

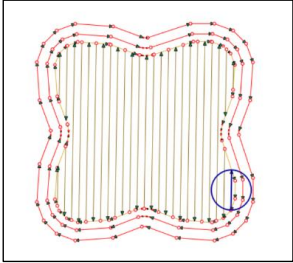
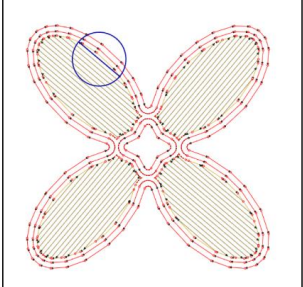
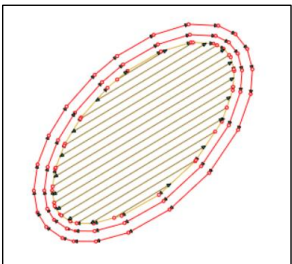
Při tisku větších průměrů pomocí standardních procesních parametrů dochází k vykreslení prvních drah laseru a poté je vnitřní oblast prutu vyšrafovaná. Parametry šrafování lze sice modifikovat, ale úprava by vyžadovala přepočty mimo software Magics.

Z energetického hlediska je zjevné, že pro větší průměry je potřeba více energie i času, jednotkové energie se pohybují v rozsahu 700 J.m^{-1} , což je hodnota mnohem vyšší, než 150 J.m^{-1} zmíněných v článku [2].

Prvním návrhem vyplývajícím z této skutečnosti je snížení výkonu laseru, popřípadě i skenovací rychlosti, aby došlo ke snížení energie a zajištění dostatečně kvalitního protavení materiálu.

Tab. 5.6 Energie, časy a simulace tisku při použití standardních procesních parametrů.

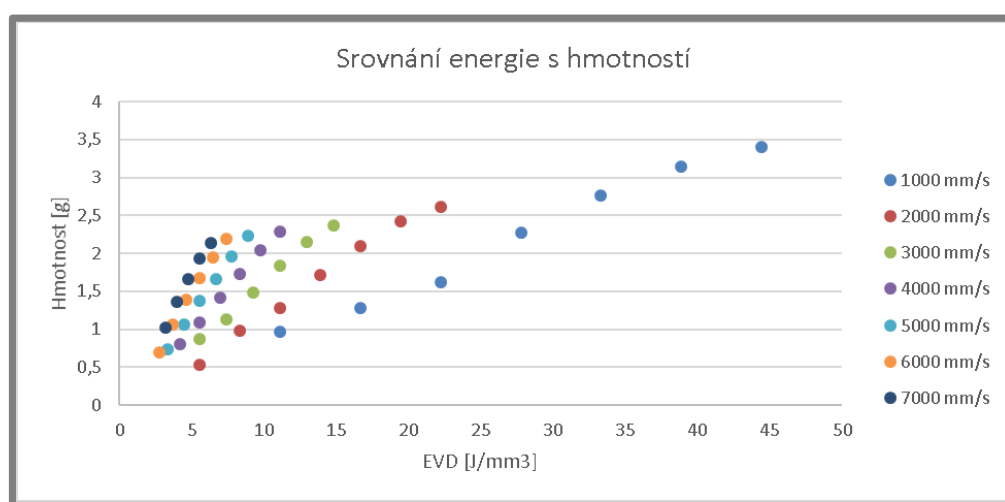
Uzel 0,6mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	0,386	J
Energie jednotková	0,7	J/mm
Energie plošná	0,59	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,001	s
		
Přechod 0,6mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	1,19	J
Energie jednotková	0,7	J/mm
Energie plošná	2,46	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,003	s
		
Prut 0,6mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	1,19	J
Energie jednotková	0,7	J/mm
Energie plošná	2,433	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,003	s
		

Uzel 1,5mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	2,127	J
Energie jednotková	0,7	J/mm
Energie plošná	3,258	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,006	s
		
Přechod 1,5mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	9,813	J
Energie jednotková	0,7	J/mm
Energie plošná	3,2	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,028	s
		
Prut 1,5mm		
EVD	58,33	J/mm3
Energie	8,692	J
Energie jednotková	0,493	J/mm
Energie plošná	2,839	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,02	s
		

5.2.2 Hledání závislosti energie na porozitě a rozměrech z poskytnutých dat

Z předešlých projektů tvořených na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně byly poskytnuty data z tisknutých vzorků o průměru prutu 0,6mm metodou SLM. Tato data byla uložena do tabulek a porovnávána s cílem nalézt závislost energie vkládané do tisku a hmotnosti, popřípadě porozity. Porovnávaná data jsou roztržena v příloze II.

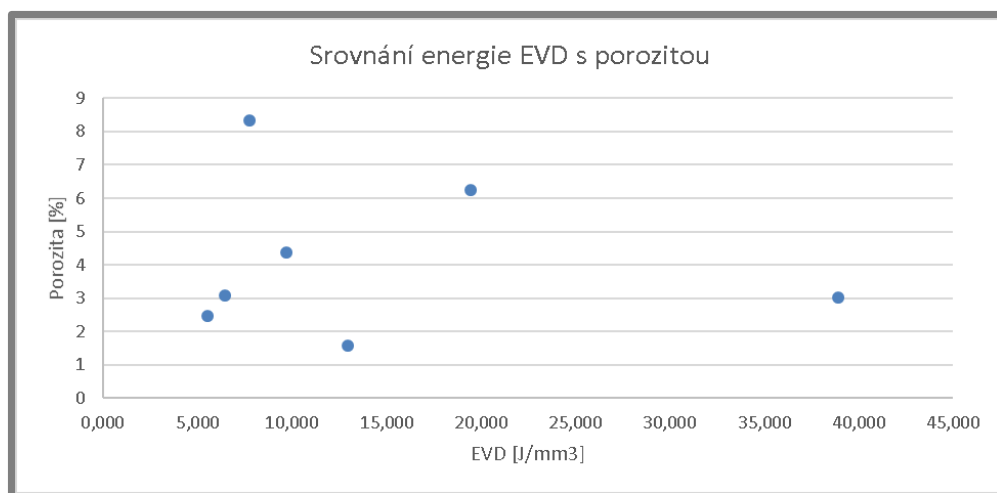
Získané hodnoty byly umístěny do grafů ve snaze nalézt závislost mezi energií EVD a hmotností a energií EVD s naměřenou hodnotou průměru prutu ve vytvořených dílech. Vzhledem k podobnosti byla v této práci uvedena jen závislost energie EVD na hmotnosti. Hodnoty jsou barevně odlišeny dle skenovací rychlosti, výkon je v závislosti vynechán. Platí však skutečnost, že s rostoucím výkonem roste energie EVD. Graf je znázorněn v obr. 5.7.



Obr. 5.7 Závislost hmotnosti na energii EVD dle skenovacích rychlostí.

Ačkoliv je zřejmé, že mezi energií a hmotností je závislost blízká polynomu, nebylo možné případné závislosti propojit se skenovací rychlostí a vytvořit tak jednotný vzorec pro vyjádření závislosti mezi energií a hmotností.

Podobné srovnání bylo utvořené i pro energii EVD ve srovnání s porozitou, ale v tomto případě nedošlo k nalezení žádné výrazné závislosti. Příčinou může být i menší množství získaných hodnot. Grafické znázornění je na obr. 5.8.

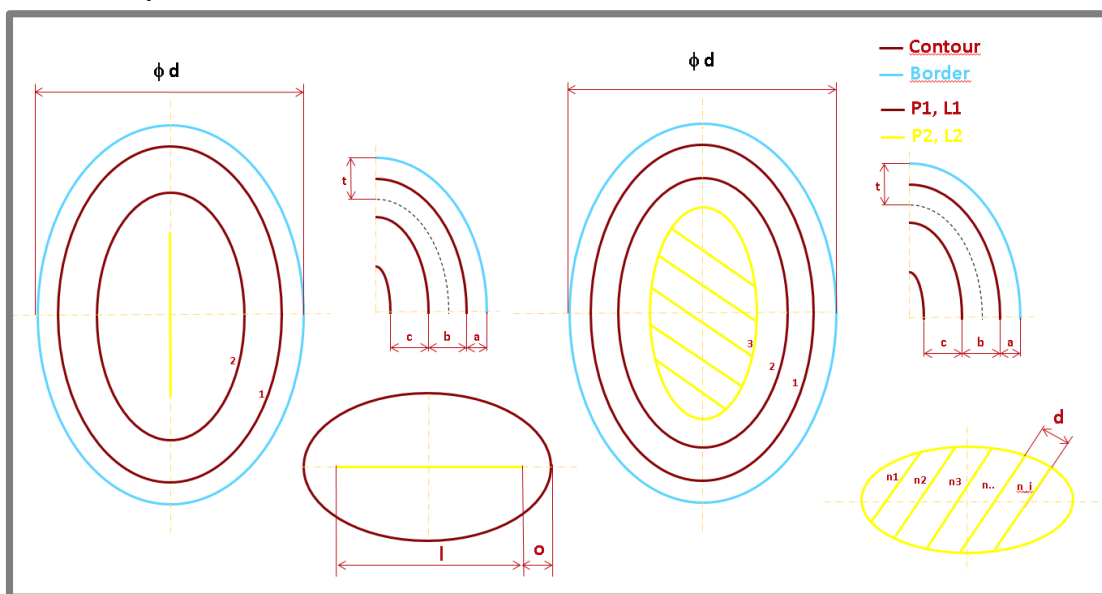


Obr. 5.8 Závislost porozity na energii EVD.

5.3 Návrh nové strategie pro všechny řezy

5.3

Pro všechny řezy byly navrženy tři nové strategie. Metoda postupného vyplňování elipsami, metoda Centerline a metoda cíleného šrafování. Obě nové metody jsou znázorněny na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Schéma strategie tisku Centerline (vlevo) a cíleného šrafování (vpravo)

5.3.1 Strategie postupného vyplňování elipsami

5.3.1

Strategie postupného vyplňování elipsami je návrh na novou strategii zaplňující celou plochu řezu prutu. Laser postupně opisuje elipsy s menšími rozměry, dokud nevyplní celou plochu. Tvorba trajektorií v programu MS Excel byla uzpůsobena především pro tuto metodu a s jejím využitím se počítá především do budoucna. Schéma této metody pro všechny tři oblasti je znázorněno na obrázcích 5.2, 5.3 a 5.5. Při volbě menších průměrů dojde spíše k tvorbě jediné elipsy, jejíž umístění by mělo zajistit protavení celého průřezu prutu či uzlu.

5.3.2 Strategie Centerline

Strategie Centerline je myšlenka doplnění poslední nejmenší elipsy, kterou laserový paprsek utvoří, čarou vedenou přímo osou elipsy. Tím bude zajištěno dokonalé protavení prutu a při optimálním nastavení procesních parametrů bude zajištěno protavení bez neprotavených či přetavených částí. Očekává se nastavení odlišných parametrů pro centrovou čáru, než jaké jsou nastaveny pro elipsy. Využití se očekává především u středně velkých až vyšších průměrů prutů, zhruba mezi 0,8-1,2mm. V excelovém programu je této strategii vymezen jeden list s modifikovatelným výpočtem pro prut, ostatní oblasti nebyly rozšiřovány dále.

5.3.3 Strategie řízeného šrafování

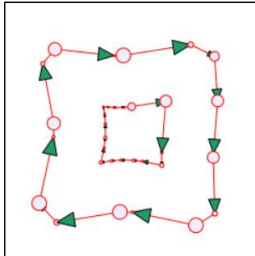
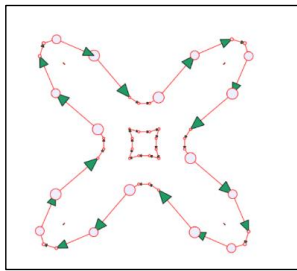
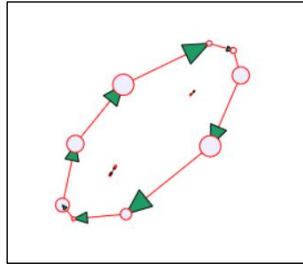
Pro průměry prutů vyšší než 1,2mm přichází v úvahu metoda řízeného šrafování. Tato strategie je v podstatě totožná s aktuálně využívanou metodou, je zde ovšem snaha analyzovat délku šrafované oblasti a tím získat vyšší přehled o času tisku a energii potřebné k utvoření prutu. Proto je v programu vyhrazen list i pro základ tohoto návrhu, který by potenciálně mohl být rozvíjen. Šrafovaná oblast by mohla být tvořena s jinými procesními parametry, podobně jako u metody Centerline.

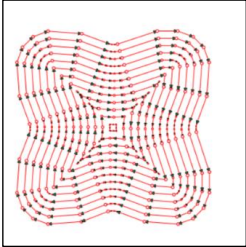
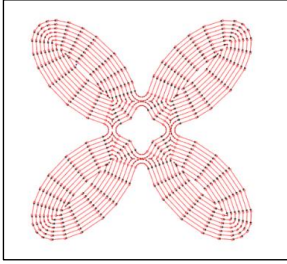
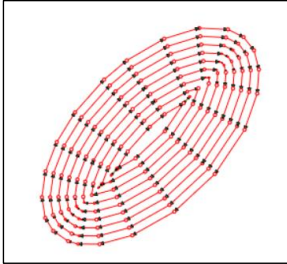
5.3.4 Odlišnost strategií pro jednotlivé řezy

Pro každou část buňky by mohla být jako vyhovující strategie zvolena jedna z možností zmíněných v předešlých podkapitolách. V případě větších rozměrů buňky by například metoda postupného vyplňování elipsami mohla být příliš časově a energeticky náročná, při menší vzdálenosti elips by vzniklo příliš mnoho drah. Metoda postupného vyplňování elipsami byla simulována pro případ buňky s průměrem prutu 0,6mm a 1,5mm pro lepší ilustraci rozdílu v tvorbě a výsledném vzhledu trajektorií. Toto porovnání je v tab. 5.7.

Pro srovnání byla rovněž utvořena tab. 5.8, ve které se nacházejí energie tvořené pomocí standardních procesních parametrů a nově navrhovaných procesních parametrů. Je zřejmé, že nové procesní parametry se více blíží k myšlence článku [2], neboť lineární energie je podstatně nižší než v případě standardních procesních parametrů. Ostatní energie jsou rovněž menší. Účelem snížení výkonu je získání lepší kvality návaru, zatímco lehké zvýšení skenovací rychlosti vede k zajištění stejného času tisku, jako u standardní strategie tisku.

Tab. 5.7 Energie, časy a simulace při použití nové strategie a nově navržených procesních parametrů.

Uzel 0,6mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	0,199	J
Energie jednotková	0,333	J/mm
Energie plošná	0,305	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,0009	s
		
Přechod 0,6mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	0,628	J
Energie jednotková	0,333	J/mm
Energie plošná	1,297	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,003	s
		
Prut 0,6mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	0,628	J
Energie jednotková	0,333	J/mm
Energie plošná	1,28	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,003	s
		

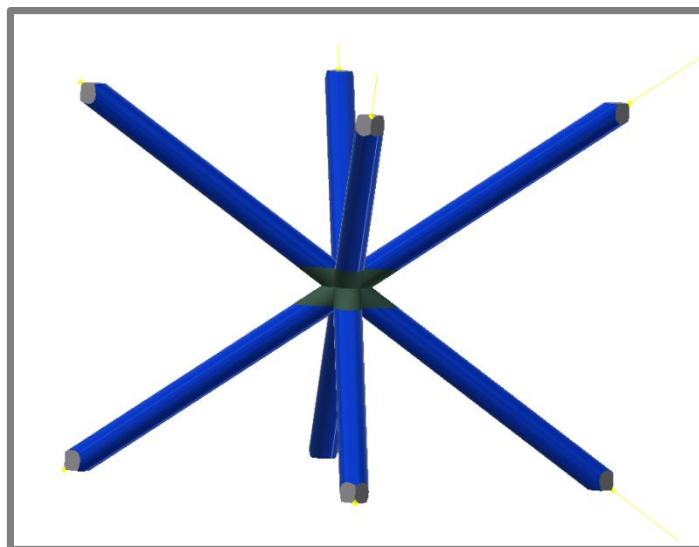
Uzel 1,5mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	1,16	J
Energie jednotková	0,333	J/mm
Energie plošná	1,787	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,005	s
		
Přechod 1,5mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	5,576	J
Energie jednotková	0,333	J/mm
Energie plošná	1,821	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,027	s
		
Prut 1,5mm		
EVD	37,04	J/mm3
Energie	4,66	J
Energie jednotková	0,222	J/mm
Energie plošná	1,523	J/mm2
Předpokládaný čas tisku	0,023	s
		

Tab. 5.8 Srovnání energií standardní a nové strategie tisku.

	0,6 Standard			0,6 New			Rozdíl		
	Prut	Přechod	Uzel	Prut	Přechod	Uzel	Prut	Přechod	Uzel
EVD	58,33	58,33	58,33	37,04	37,04	37,04	21,29	21,29	21,29
Energie	1,19	1,19	0,386	0,628	0,628	0,199	0,562	0,562	0,187
Energie jednotková	0,7	0,7	0,7	0,333	0,333	0,333	0,367	0,367	0,367
Energie plošná	2,433	2,46	0,59	1,28	1,297	0,305	1,153	1,163	0,285
Předpokládaný čas tisku	0,003	0,003	0,001	0,003	0,003	0,0009	0	0	0,0001

	1,5 Standard			1,5 New			Rozdíl		
	Prut	Přechod	Uzel	Prut	Přechod	Uzel	Prut	Přechod	Uzel
EVD	58,33	58,33	58,33	37,04	37,04	37,04	21,29	21,29	21,29
Energie	8,692	9,813	2,127	4,66	5,576	1,16	4,032	4,237	0,967
Energie jednotková	0,493	0,7	0,7	0,222	0,333	0,333	0,271	0,367	0,367
Energie plošná	2,839	3,2	3,258	1,523	1,821	1,787	1,316	1,379	1,471
Předpokládaný čas tisku	0,02	0,028	0,006	0,023	0,027	0,005	-0,003	0,001	0,001

Pro případ prutů by bylo užitečnější aplikovat jinou metodu, například metodu řízeného šrafování. Uzel prutu by mohl být efektivněji tvořen metodou Centerline, stejně tak i přechod mezi pruty a uzlem v případě průměru 1,5mm. Při větších rozměrech je trajektorií nad očekávání velký počet a je třeba tak vymezit lepší možnosti. Pro takové případy by bylo potřeba rozdělit buňku na více částí a pro každou část nastavit odlišné strategie tisku a procesní parametry. Rozdělení by bylo do tří úseků, které vymezují dvě roviny. Obě roviny by byly umístěny do hranic mezi pruty a uzlem, viz snímek z modelu v programu Autodesk Inventor na obr. 5.10.



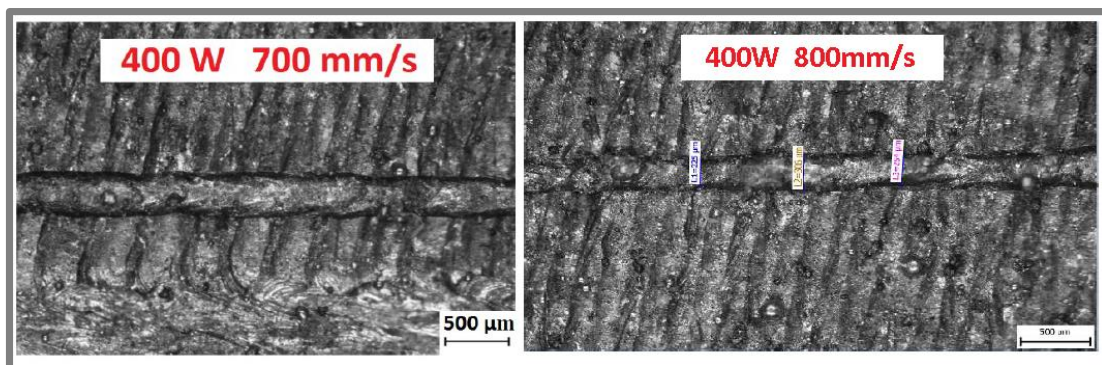
Obr. 5.10 Barevně rozlišená buňka dle oblastí s odlišnými strategiemi tisku.

Vymezení rovin naznačuje možnost jiného řešení. Je zjevné, že oblast uzlu vykazuje odlišné tvary a povrchy, přichází tak v potaz tvorba buňky o jiném tvaru. Pruty by mohly být spojeny například koule o určitém průměru, potažmo by na sebe mohly navazovat plynuleji. Tyto varianty by mohly být předmětem dalších výzkumů.

5.3.5 Návrh strategie a procesních parametrů, testovací sady

5.3.5

Pro návrh nové strategie byly analyzovány experimenty prováděné na Ústavu konstruování na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Cílem těchto experimentů bylo nalézt optimální procesní parametry pro zajištění celistvé a plynulé *Single line*. Bylo provedeno několik testů a ve výsledku byly nalezeny parametry, které tuto podmínku splnily. Tyto případy jsou zachyceny na obr. 5.11.



Obr. 5.11 Ukázka *Single lines* tvořených v rámci experimentu.

Při těchto parametrech byla změřena šířka *Single line* pro případnou optimalizaci nastavení vzdálenosti mezi elipsami. Pro případ 400 W a 700 mm.s⁻¹ bylo naměřeno 0,4 mm, pro 400 W a 800 mm.s⁻¹ bylo naměřeno 0,3 mm. Byl tak potvrzen prvotní předpoklad, že ovlivněný průměr je přibližně roven 0,3 mm.

Pro srovnání s těmito výsledky bylo stanoveno procesní okno dle článku [2]. V článku se šířka *Single line* nepočítá, přesto je zde zmíněn interval, v němž by návary měly být celistvé. Pro výkon 170 W byl stanoven rozsah skenovacích rychlostí 600 – 800 mm.s⁻¹, pro výkon 180 W rozsah rychlostí 600 – 1000 mm.s⁻¹ a pro výkon 200 W rozsah rychlostí 600 – 1400 mm.s⁻¹,

Vzhledem k rozdílným hodnotám v článku i v experimentu byly pro testovací sadu stanoveny celkem tři typy procesních parametrů. Pro každý typ byl určen přesný počet vzorků, jejichž rozmístění a popis byl stanoven na obr. 5.12.

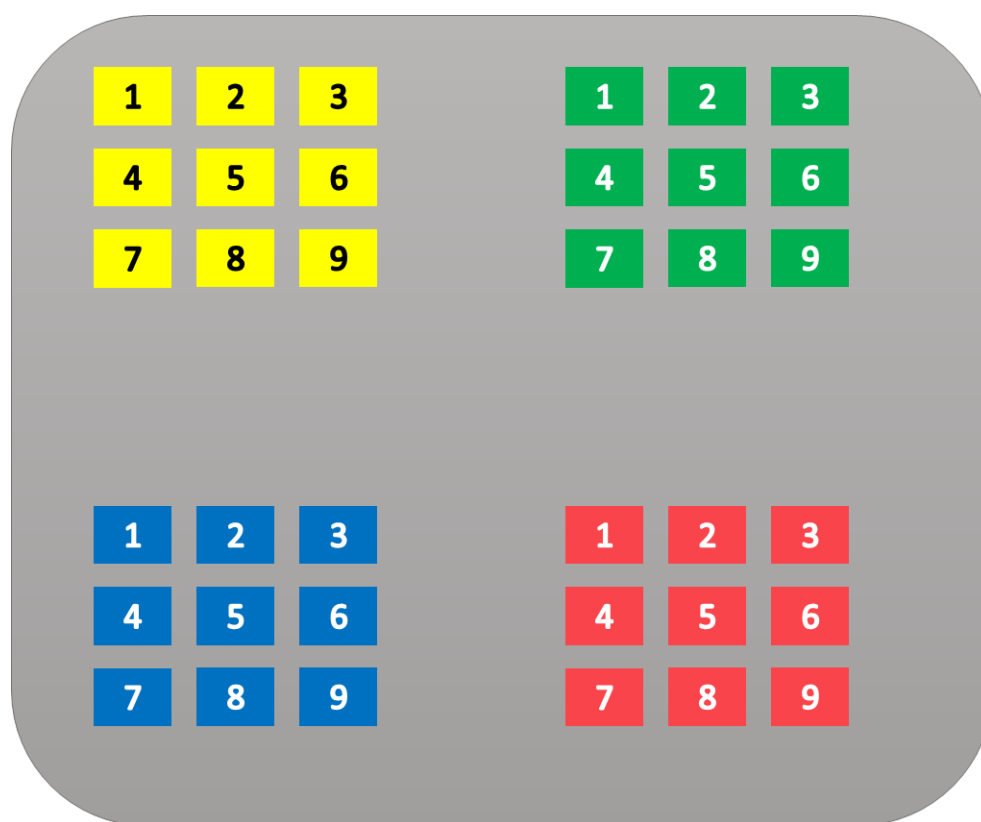
Žlutě vyznačené vzorky byly určeny podle experimentu. První tři vzorky s nastaveným výkonem 300 W a skenovacími rychlostmi 700, 750 a 800 mm.s⁻¹ z důvodu upřesnění experimentu. Další tři vzorky s výkonem 350 W a skenovacími rychlostmi 700, 750 a 800 mm.s⁻¹. Poslední řada žlutě vyznačených vzorků pak výkon 400 W a skenovací rychlosti opět 700, 750 a 800 mm.s⁻¹. Průměr prutu jednotný, 0,6 mm.

Modře vyznačená oblast byla vymezena podle článku [2]. První řada s výkonem 170 W a skenovacími rychlostmi 600, 700 a 800 mm.s⁻¹. Druhá řada s výkonem 180 W a skenovacími rychlostmi 600, 800 a 1000 mm.s⁻¹. Třetí řada s výkonem 200 W a skenovacími rychlostmi 600, 1000 a 1400 mm.s⁻¹. Průměr prutu jednotný, 0,6 mm.

Zelená sada vzorků byla nastavena podle hodnot počítaných ve vytvořeném programu. Výkon 200 W, skenovací rychlost 600 mm.s^{-1} , Pro tuto sadu byl měněn průměr prutu. První řada o průměru 0,6 mm, druhá řada 0,8 mm a třetí řada 1 mm. Větším množstvím shodných dílů lze analyzovat, zda se díly vyrobí všechny, nebo nastane situace, kdy se nevyrobí jeden nebo dva ze tří.

Červená sada vzorků odpovídá opět hodnotám získaným experimentem, tentokrát pro všechny vzorky se stejným výkonem 400 W a jednotnou skenovací rychlostí 750 mm.s^{-1} . Průměry prutů by se měnily stejně, jako u předešlé sady. 0,6 mm, 0,8 mm a 1 mm.

Celkem bude vyrobeno 36 dílů, jejichž analýza povede k dalším výzkumům nově navržené strategie.



Obr. 5.12 Rozmístění testovací sady.

6 DISKUZE

6 ---

Aditivní technologie jsou metody tisku tvarově složitých součástí a dílů, která umožňuje tvorbu modelů, pro něž konvenční metody nemají dostatečnou technologii a brání jim v tom limitace jejich možností. I aditivní technologie ovšem vyžadují nalezení optimálních oblastí a parametrů, aby byly pevně stanoveny jejich limitace a jejich nejlepší možné varianty. Je potřeba nalézt energetické vztahy a závislosti mezi jednotlivými parametry v praktickém výsledku.

Pro návrh nové strategie tisku lze určit nové procesní parametry. Tato strategie zatím nebyla využita a nabízí proto možnost stanovit její hranice již v základu. Energetické hledisko tisku stále nedokáže přesně určit, zda dojde k plnému protavení prutu a tisku dle předpokladů, ačkoliv se objevilo pár předpokladů pro vymezení rozsahu energií, v němž by se tisk měl pohybovat pro zajištění optimálních vlastností vyrobeného vzorku.

Pro nové strategie tisku je pravděpodobně bezpečnější volba menších energií, aby bylo zajištěno, že nedojde k přetavení materiálu a jeho následnému rozpadu. Menší energie může naopak vést k nedotaveným částem, ty by ale mohly poskytnout minimálně vzorky pro materiálové rozborů a analýzu hloubky, do jaké byl materiál laserem ovlivněn.

Tvorba a další rozšiřování programu pro výpočet procesních parametrů při odlišných variantách tisku může umožnit vytvořit unikátní software pracující se základními veličinami a předpoklady, které lze rozvést a navázat na ně nové objevy z hlediska ovlivněných oblastí při tisku, tepelných pochodů i materiálových struktur.

Z těchto důvodů byla stanovena testovací sada tak, aby byla zjištěna přesnost a kvalita navrhovaných strategií a parametrů. Jednotlivé varianty budou porovnány a vyhodnoceny z hlediska úspěšnosti tisku a z hlediska možného opětovného vyrobení. Zároveň dojde ke srovnání jednotlivých zdrojů procesních parametrů.

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo studium zdrojů zaměřených na problematiku procesních parametrů při tisku mikroprutových struktur metodou Selective Laser Melting. Bylo analyzováno několik článků v oblasti materiálů i technologií a byly tak stanoveny prvotní předpoklady pro nastavení procesních parametrů pro nové strategie tisku.

Nejprve byly rozebrány vědecké články zabývající se danou problematikou, které stanovily základní charakteristiky a doporučené postupy, z nichž by se měly odvíjet další kroky při tvorbě mikroprutových struktur.

Následně byl utvořen software v programu MS Excel, který umožňuje nastavovat procesní parametry a počítat s jejich pomocí čas působení laseru, protavenost materiálu a případné riziko vzniku nedostatků ve struktuře,

Pro tento program byly navrženy tři nové strategie tisku, které umožní počítat trajektorii laseru přesněji, získat tak přesnější hodnoty, analyzovat situaci ve strukturách z energetického hlediska a měnit procesní parametry na základě výpočtů, zda dojde k úplnému protavení.

Poté byly z dostupných dat navrženy nové parametry, které by mohly vést ke vzniku geometricky přesných mikroprutových struktur se zachováním mechanických vlastností.

Tyto parametry a strategie byly navrženy do testovací sady sestávající z více sektorů buněk o různých průměrech prutů, aby byly vyhodnoceny poznatky získané z experimentu a z článků.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Selective Laser Melting* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/b-selective-laser-melting.html>
- [2] KEMPEN, K., L. THIJIS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH, 2015. Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology* [online]. **31**(8), 917–923. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1179/1743284714Y.0000000702
- [3] THIJIS, Lore, Karolien KEMPEN, Jean Pierre KRUTH a Jan VAN HUMBEECK, 2013. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* [online]. **61**(5), 1809–1819. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2012.11.052
- [4] ABOULKHAIR, Nesma T., Ian MASKERY, Chris TUCK, Ian ASHCROFT a Nicola M. EVERITT, 2016. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. B.m.: Elsevier B.V., **230**, 88–98. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.016
- [5] ABELE, Eberhard, Hanns A. STOFFREGEN, Klaus KLIMKEIT, Holger HOCHÉ a Matthias OECHSNER, 2015. Optimisation of process parameters for lattice structures. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **21**(1), 117–127. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-10-2012-0096
- [6] YU, Guanqun, Dongdong GU, Donghua DAI, Mujian XIA, Chenglong MA a Qimin SHI, 2016. On the role of processing parameters in thermal behavior, surface morphology and accuracy during laser 3D printing of aluminum alloy. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. B.m.: IOP Publishing, **49**(13), 135501. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/49/13/135501
- [7] KAMARUDIN, K, M S WAHAB, Z SHAYFULL, Aqeel AHMED a A A RAUS, 2016. Dimensional Accuracy and Surface Roughness Analysis for AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting (SLM) [online]. **1077**. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20167801077
- [8] VRÁNA, R. *Návrh porézních struktur pro aditivní výrobu technologií selective laser melting* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 96 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [9] *Schmelzmaschine* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.directindustry.de/prod/slm-solutions/product-114591-1184403.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>SLM</i>	- Selective laser melting
<i>EVD</i> [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$]	- objemová hustota energie
<i>E</i> [J]	- energie laseru
<i>a</i> [mm]	- velikost hlavní poloosy
<i>b</i> [mm]	- velikost vedlejší poloosy
<i>S</i> [mm^2]	- plošný obsah
α [°]	- prostorový úhel
<i>t</i> [s]	- čas tvorby trajektorie laseru
<i>o</i> [mm]	- obvod dráhy laseru
<i>P</i> [W]	- výkon laseru

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1 Ukázka strukturovaného materiálu tvořená metodou SLM. [1]	14
Obr. 2.1 Definice oblasti optimálních procesních parametrů metodou Single track. [2]	15
Obr. 2.2 Definice oblasti optimálních procesních parametrů dle struktury materiálu v řezu. [2]	16
Obr. 2.3 Skenovací strategie použité pro vzorky. SD = směr skenu, BD = směr vrstvení, TD = transversální směr. [3]	17
Obr. 2.4 Snímky zachycující krystalovou orientaci zrn pomocí metody EBSD. [3]	18
Obr. 2.5 Trajektorie laseru utvořené metodou Single track s předepsanými skenovacími rychlostmi. [4]	19
Obr. 2.6 Trajektorie laseru na materiálu AlSi10Mg. Skenovací rychlosti u jednotlivých snímků jsou 250 mm/s (a), 500 mm/s (b) a 750 mm/s (c). [4]	19
Obr. 2.7 Trajektorie laseru na materiálu AlSi10Mg z pohledu řezu. Skenovací rychlosti u jednotlivých snímků jsou (zleva) 250 mm/s, 500 mm/s a 750 mm/s. [4]	20
Obr. 2.8 Trajektorie laseru u zkušebních vzorků tisknutých metodou SLM. [5]	20
Obr. 2.9 Trajektorie laseru s vychýlením laserového paprsku. [5]	21
Obr. 2.10 Ukázka zmenšení výšky materiálu po tisku metodou SLM. [6]	22
Obr. 2.11 Slinování práškové směsi při různých výkonech laseru. [6]	22
Obr. 2.12 Model vytvořený pro testování komplexních tvarů pro tisk metodou SLM. [7]	23
Obr. 2.13 Zvolené oblasti a měřené rozměry pro určení geometrické přesnosti. [7]	24
Obr. 4.1 Schéma principu technologie Selective laser melting. [8]	28
Obr. 4.2 Stroj SLM 280 HL [9]	28
Obr. 5.1 Grafické znázornění obvodů a povrchů jednotlivých vrstev	33
Obr. 5.2 Nová strategie tisku tvořená postupně se zmenšujícími elipsami.	35
Obr. 5.3 Strategie tisku v přechodu mezi uzlem a pruty.	36
Obr. 5.4 Závislost délky části elipsy na velikosti vedlejší poloosy.	37
Obr. 5.5 Strategie tisku pro řez uzlem.	37
Obr. 5.6 3D graf energie EVD v závislosti na procesních parametrech.	38
Obr. 5.7 Závislost hmotnosti na energii EVD dle skenovacích rychlostí.	40
Obr. 5.8 Závislost porozity na energii EVD.	41
Obr. 5.9 Schéma strategie tisku Centerline (vlevo) a cíleného šrafování (vpravo)	41
Obr. 5.10 Barevně rozlišená buňka dle oblastí s odlišnými strategiemi tisku.	44
Obr. 5.11 Ukázka Single lines tvořených v rámci experimentu.	45
Obr. 5.12 Rozmístění testovací sady.	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Procesní parametry a skenovací strategie tisknutých vzorků. [3]	17
Tab. 2.2 Procesní parametry u zkušebních vzorků tisknutých metodou SLM. [5]	21
Tab. 2.3 Hodnoty struktury povrchů vyrobených 3D tiskem metodou SLM. [7]	24
Tab. 2.4 Výsledky rozměrových měření pro variantu „a“. [7]	24
Tab. 2.5 Výsledky rozměrových měření pro variantu „b“. [7]	25
Tab. 2.6 Výsledky rozměrových měření pro variantu „c“. [7]	25
Tab. 2.7 Výsledky rozměrových měření pro variantu „d“. [7]	25
Tab. 5.1 Tabulka vstupních a výstupních parametrů pro výpočet energií	30
Tab. 5.2 Tabulka energií a obvodu počítaného pro analýzu strategie tisku.	31
Tab. 5.3 Definice geometrie prutu v programu na výpočet energií.	34
Tab. 5.4 Výpočet obvodu pro oblast řezu úplného prutu.	35
Tab. 5.5) Nově navržené procesní parametry.	38
Tab. 5.5 a) Standardní procesní parametry.	38
Tab. 5.6 Energie, časy a simulace tisku při použití standardních procesních parametrů.	39
Tab. 5.7 Energie, časy a simulace při použití nové strategie a nově navržených procesních parametrů.	43
Tab. 5.8 Srovnání energií standardní a nové strategie tisku.	44

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA I – Výpočet trajektorie laseru pro řez uzlem buňky

PŘÍLOHA II – Hodnoty energií EVD, průměrů prutu dle jednotlivých metod, hmotností a porozit

PŘÍLOHA III – Ukázka excelového souboru pro výpočet energií.

Výpočet trajektorie laseru pro řez uzlem buňky

Pořadí	Délka oblouku	Délka celé elipsy	Poměr oblouk/elipsa	Vzdálenost mezi tracky	a	b	Oblouk pomocí vzorce	Rozdíl
1	2,643	10,134	26,08052102	0,05	1,69045	1,5	2,6353	-0,0077
2	2,565	9,82	26,12016293	0,05	1,641585714	1,45	2,55812	-0,00688
3	2,487	9,506	26,16242373	0,05	1,592721429	1,4	2,48094	-0,00606
4	2,408	9,193	26,19384314	0,05	1,543857143	1,35	2,40376	-0,00424
5	2,33	8,879	26,24169388	0,05	1,494992857	1,3	2,32658	-0,00342
6	2,252	8,565	26,29305312	0,05	1,446128571	1,25	2,2494	-0,0026
7	2,173	8,251	26,33620167	0,05	1,397264286	1,2	2,17222	-0,00078
8	2,095	7,938	26,3920383	0,05	1,3484	1,15	2,09504	-4E-05
9	2,017	7,624	26,45592865	0,05	1,299535714	1,1	2,01786	0,00086
10	1,939	7,311	26,52167966	0,05	1,250671429	1,05	1,94068	0,00168
11	1,861	6,997	26,59711305	0,05	1,201807143	1	1,8635	0,0025
12	1,782	6,684	26,66068223	0,05	1,152942857	0,95	1,78632	0,00432
13	1,704	6,371	26,74619369	0,05	1,104078571	0,9	1,70914	0,00514
14	1,626	6,058	26,84054143	0,05	1,055214286	0,85	1,63196	0,00596
15	1,548	5,744	26,94986072	0,05	1,00635	0,8	1,55478	0,00678
16	1,471	5,431	27,08525133	0,05	0,957485714	0,75	1,47776	0,0066
17	1,393	5,119	27,21234616	0,05	0,908621429	0,7	1,40042	0,00742
18	1,315	4,806	27,36163129	0,05	0,859757143	0,65	1,32324	0,00824
19	1,238	4,494	27,54784157	0,05	0,810892857	0,6	1,24606	0,00806
20	1,161	4,181	27,76847644	0,05	0,762028571	0,55	1,16888	0,00788
21	1,084	3,869	28,0175756	0,05	0,713164286	0,5	1,0917	0,0077
22	1,008	3,558	28,33052277	0,05	0,6643	0,45	1,01452	0,00652
23	0,932	3,247	28,70341854	0,05	0,615435714	0,4	0,93734	0,00534
24	0,857	2,937	29,1794348	0,05	0,566571429	0,35	0,86016	0,00316
25	0,783	2,621	29,87409386	0,05	0,5196	0,3	0,78798	-2E-05
26	0,710	2,314	30,68280035	0,05	0,4696	0,25	0,7058	-0,0042
27	0,640	2,008	31,87250996	0,05	0,4196	0,2	0,62862	-0,01138
28	0,574	1,706	33,64595545	0,05	0,3696	0,15	0,55144	-0,02256
29	0,514	1,41	36,45390071	0,05	0,3196	0,1	0,47426	-0,03974
30	0,465	1,127	41,25998225	0,05	0,2696	0,05	0,39708	-0,06792
31	0,23	0,46	50	0,05	0,2302	0	0,3199	0,0899

Hodnoty energií EVD, průměrů prutu dle jednotlivých metod, hmotností a porozit

Rychlost	Výkon	m	Průměr(Gauss)	Průměr (MaxIn)	Průměr (MinOut)	EVD
1000	100	0,974	0,43875	-	0,5798	11,11111
1000	150	1,283	0,481525	0,348325	0,654525	16,66667
1000	200	1,622	0,500925	0,3867	0,716825	22,22222
1000	250	2,277	0,590375	0,479025	0,806275	27,77778
1000	300	2,769	0,671825	0,599725	0,872275	33,33333
1000	350	3,141	0,73145	0,631175	0,9586	38,88889
1000	400	3,405	0,779775	0,6154	1,012525	44,44444
2000	100	0,531	-	-	-	5,55556
2000	150	0,981	0,4064	0,293	0,564033333	8,333333
2000	200	1,276	0,44265	0,3309	0,63775	11,11111
2000	250	1,718	0,54005	0,44885	0,736625	13,88889
2000	300	2,094	0,580825	0,509175	0,751025	16,66667
2000	350	2,418	0,6276	0,5592	0,7662	19,44444
2000	400	2,621	0,659875	0,57365	0,8742	22,22222
3000	100		-	-	-	
3000	150	0,873	-	-	-	5,55556
3000	200	1,13	0,392125	-	0,551225	7,407407
3000	250	1,489	0,521425	0,4338	0,710525	9,259259
3000	300	1,839	0,56555	0,489775	0,750125	11,11111
3000	350	2,157	0,5901	0,513225	0,761375	12,96296
3000	400	2,364	0,626025	0,56265	0,781275	14,81481
4000	100		-	-	-	
4000	150	0,81	-	-	-	4,16667
4000	200	1,091	0,4169	-	0,652025	5,55556
4000	250	1,421	0,491125	0,406733333	0,659475	6,944444
4000	300	1,73	0,5367	0,471025	0,66345	8,333333
4000	350	2,044	0,58845	0,500325	0,781025	9,722222
4000	400	2,289	0,630975	0,54925	0,8439	11,11111
5000	100		-	-	-	
5000	150	0,737	-	-	-	3,333333
5000	200	1,062	0,436375	-	0,678375	4,444444
5000	250	1,375	0,49275	0,4111	0,6772	5,55556
5000	300	1,658	0,5605	0,456425	0,771925	6,66667
5000	350	1,956	0,586125	0,502275	0,763675	7,777778
5000	400	2,236	0,629825	0,53665	0,88585	8,888889
6000	100		-	-	-	
6000	150	0,694	-	-	-	2,777778
6000	200	1,068	0,390266667	0,306	0,507566667	3,703704
6000	250	1,385	0,481366667	0,42735	0,617033333	4,62963
6000	300	1,669	0,538925	0,4473	0,70875	5,55556
6000	350	1,949	0,574475	0,4973	0,729275	6,481481
6000	400	2,186	0,617375	0,5213	0,842725	7,407407
7000	100		-	-	-	
7000	150		-	-	-	
7000	200	1,016	0,383375	0,30715	0,555575	3,174603
7000	250	1,359	0,47745	0,392733333	0,63295	3,968254
7000	300	1,666	0,545725	0,460875	0,701625	4,761905
7000	350	1,931	0,585925	0,47935	0,8018	5,55556
7000	400	2,132	0,61715	0,495675	0,866875	6,349206

P [W]	v [mm/s]	m [g]	VED [J/mm3]	Porozita [%]
350	1000	3,141	38,889	3,01
350	2000	2,418	19,444	6,25
350	3000	2,157	12,963	1,56
350	4000	2,044	9,722	4,36
350	5000	1,956	7,778	8,32
350	6000	1,949	6,481	3,08
350	7000	1,931	5,556	2,46

Ukázka excelového souboru pro výpočet energií

